

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

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

南京工业区分夏季二次有机气溶胶浓度估算及来源解析	刘静达, 安俊琳, 张玉欣, 师远哲, 林旭 (1733)
南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性	梁静舒, 安俊琳, 王红磊, 张玉欣, 王俊秀, 施双双, 王潇 (1743)
广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素	高元官, 张凯, 王体健, 陈志明, 耿红, 孟凡 (1753)
神农架大九湖大气中的多环芳烃	金梦云, 邢新丽, 柯艳萍, 郑煌, 胡天鹏, 孙焰, 丁洋, 李绘, 张泽洲, 祁士华 (1760)
沧州市春季 NMHCs 空间分布特征	段菁春, 周雪明, 张鹤丰, 谭吉华, 胡京南, 柴发合 (1769)
北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征	梁云平, 张大伟, 林安国, 马召辉, 郭晓东 (1775)
生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析	邵珠泽, 郑国砥, 王元刚, 高定, 朱彦莉, 陈同斌, 聂二旗 (1783)
低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性	姜理英, 张迪, 郭海倩, 缪晶晶, 陈怡伶, 李慧 (1792)
运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析	武媛媛, 李如梅, 彭林, 端允, 王海京, 李颖慧, 白慧玲, 牟玲 (1799)
高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险: 以常州市为例	姚静波, 王明新, 齐今笛, 孙向武, 张文艺 (1807)
上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系	董小芳, 邓黄月, 张彦, 朱志鹏, 王琳, 郑祥民, 周立旻 (1817)
DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响	张允华, 楼狄明, 谭丕强, 胡志远 (1828)
我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价	张秋秋, 潘申龄, 刘伟, 张昱, 安伟 (1835)
基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估	王阳, 徐明芳, 耿梦梦, 黎明, 耿耕南 (1842)
北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险	张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 赵晓辉, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (1852)
长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素	孙语嫣, 白莹, 苏荣国, 石晓勇 (1863)
垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制	肖晓, 何小松, 高如泰, 席北斗, 张慧, 黄彩红, 李丹, 袁志业 (1873)
3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用	李立青, 胡楠, 刘雨情, 涂声亮, 陈华超 (1881)
三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响	陈成龙, 高明, 倪九派, 谢德体, 邓华 (1889)
NO ₃ ⁻ -N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响	姜应和, 李瑶, 张莹, 张翔凌 (1898)
湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响	李薛晓, 程思超, 方舟, 李先宁 (1904)
阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响	丁为俊, 于立亮, 陈杰, 成少安 (1911)
臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响	刘海龙, 付晶森, 郭雪峰, 柴建恬, 张忠民 (1918)
紫外线和次氯酸钠对 <i>Escherichia coli</i> 和 Poliovirus 的消毒作用	徐丽梅, 张崇森, 王晓昌, 吉铮, 周进宏 (1928)
不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用	王星星, 林建伟, 詹艳慧, 张志斌, 邢云青, 姜博汇, 储鸣 (1936)
树脂基纳米钛锆氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟	陈家凯, 聂广泽, 刘志英, 姚远, 徐炎华 (1947)
灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响	朱培颖, 李大鹏, 于胜楠 (1957)
城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律	桑浪涛, 石烜, 张彤, 付博文, 金鹏康 (1965)
11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋	周林军, 古文, 刘济宁, 石利利, 徐炎华 (1972)
反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性	金鹏康, 杨珍瑞, 李蓉, 李岩, 周立辉 (1982)
Fe ⁽⁰⁾ -活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素	吕永涛, 刘婷, 曾玉莲, 孙婷, 张瑶, 王磊 (1991)
两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较	李惠娟, 彭党聪, 陈国燕, 王博, 姚倩, 卓杨 (1997)
基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (2006)
温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响	范军辉, 郝瑞霞, 朱晓霞, 万京京, 刘思远, 王丽沙 (2012)
SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析	杨波, 徐辉, 冯修平, 李方, 田晴, 马春燕 (2021)
喹啉降解菌 <i>Ochrobactrum</i> sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用	徐伟超, 吴翠平, 张玉秀, 张琪, 张怡鸣 (2030)
锰氧化菌 <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制	万文结, 薛芷筠, 张泽文, 何冬兰 (2036)
温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (2044)
包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析	许晓毅, 尤晓露, 吕晨培, 王斌, 胡碧波 (2052)
强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落	曹知平, 吴静, 左剑恶, 王晓璐, 王翀, 王广启, 王凯军, 钱易 (2059)
三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征	秦红, 任庆水, 杨文航, 李昌晓 (2065)
川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素	田琳琳, 朱波, 汪涛, 赵原, 董宏伟, 任光前, 胡磊 (2074)
双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N ₂ O 排放的影响	伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 陈春兰, 王娟, 魏文学, 李勇 (2084)
生物炭介导的不同地表条件下土壤 N ₂ O 的排放特征	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (2093)
垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征	熊瑛, 王龙昌, 杜娟, 赵琳璐, 周泉, 张赛 (2102)
广东省土壤 Cd 含量空间分布预测	孙慧, 郭治兴, 郭颖, 袁宇志, 柴敏, 毕如田, 杨静 (2111)
宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价	张鹏岩, 康国华, 庞博, 郭依, 何坚坚, 秦明周 (2125)
腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响	王青清, 蒋珍茂, 王俊, 魏世强 (2136)
紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征	李秋言, 赵秀兰 (2146)
生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用	吴志娟, 毕二平 (2154)
两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制	王彤彤, 马江波, 曲东, 张晓媛, 郑纪勇, 张兴昌 (2161)
牛粪源蛭蚶及其生物炭对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 的吸附特性	杜文慧, 朱维琴, 潘晓慧, 沈旭阳, 陈思远, 陈可乐, 坎吉汗·木沙拉, 张杭君, 丁颖 (2172)
C ₃ N ₄ /BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制	鲍玥, 周旻昀, 邹骏华, 史宇滨, 万先凯, 史惠祥 (2182)
《环境科学》征稿简则 (2020) 《环境科学》征订启事 (2035) 信息 (1782, 1798, 1827)	

温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响

范军辉^{1,2}, 郝瑞霞^{1*}, 朱晓霞¹, 万京京¹, 刘思远¹, 王丽沙¹

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124; 2. 北京碧水源科技股份有限公司, 北京 100084)

摘要: 为了探究温度对纤维素类降解菌和反硝化细菌的影响, 分析了固相纤维素碳源玉米芯 + 硫铁填料脱氮除磷复合系统 (solid carbon source of cellulose and sulfur/sponge iron process, SCSC-S/Fe 复合系统) 在不同温度下脱氮除磷效果, 通过扫描电镜 (SEM) 和 MiSeq 高通量测序技术对反应前后玉米芯表面结构及微生物特性进行分析。结果表明, 温度从 15、20、25℃ 升高到 30℃ 过程中, 该系统 TN 平均去除率从 78.88% 增加到 92.70%、TP 平均去除率从 82.58% 增加到 89.15%; 反应后玉米芯表面以球状和杆状微生物为主; 纤维素类降解菌所占比例在 30℃ 比 20℃ 时高出 11.01%, 而反硝化细菌所占比例降低了 21.26%。可见, 纤维素降解菌比反硝化细菌对温度更敏感, 受温度影响更大。

关键词: 温度; 纤维素类降解菌; 反硝化细菌; MiSeq 高通量测序; 微生物群落特性

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-2012-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201611007

Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe

FAN Jun-hui^{1,2}, HAO Rui-xia^{1*}, ZHU Xiao-xia¹, WAN Jing-jing¹, LIU Si-yuan¹, WANG Li-sha¹

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering, College of Architectural Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Origin Water Technology Co., Ltd., Beijing 100084, China)

Abstract: In order to investigate the effect of temperature on the cellulose-degrading bacteria and denitrifying bacteria, the denitrification and phosphorus removal of solid carbon source of cellulose corncob + sulfur/sponge iron nitrogen and phosphorus removal composite system, abbreviated as SCSC-S/Fe, was analyzed under different temperature conditions, and the surface structure and microbial properties of corncob before and after reaction were analyzed by scanning electron microscope (SEM) and MiSeq high-throughput sequencing technologies. The results indicated that when temperature increased from 15, 20, 25 to 30℃, the average TN removal rate of the system increased from 78.88% to 92.70%, the average removal rate of TP increased from 82.58% to 89.15%; microbial properties showed that the surface reaction after corncob was dominated by spherical and rod-shaped microorganisms; the proportion of cellulose-degrading bacteria was 11.01% higher at 30℃ than 20℃, and the proportion of denitrifying bacteria decreased by 21.26%. It can be seen that the cellulose-degrading bacteria were more sensitive to the temperature than the denitrification bacteria, and more obviously affected by the temperature.

Key words: temperature; cellulose-degrading bacteria; denitrifying bacteria; MiSeq high throughput sequencing; microbial community characteristics

再生水回用是解决城市水资源危机的必然途径^[1]。作为再生水水源的城市污水处理厂尾水中仍有一定浓度的氮、磷含量, 严重影响再生水的品质及其使用价值^[2]。因此为了确保再生水品质有必要对城市污水处理厂尾水进行深度脱氮除磷处理。然而城市污水处理厂尾水存在 C/N 比低和工艺实现同步脱氮除磷较为困难等问题^[3]。

固相纤维素碳源玉米芯因实现了低 C/N 比尾水深度反硝化脱氮而备受关注^[4,5]。然而, 单纯以玉米芯作为反应器填料难以实现反硝化脱氮同步高效除磷。有研究表明^[3,6,7], 硫磺与海绵铁混合而成的

硫铁复合填料在低 C/N 比尾水深度脱氮除磷方面具有独特的优势。将纤维素碳源玉米芯与硫铁复合填料有机结合构造出固相纤维素碳源 + 硫铁填料脱氮除磷复合系统 (solid carbon source of cellulose and sulfur/sponge iron process, SCSC-S/Fe 复合系统), 将实现低 C/N 比尾水深度反硝化脱氮同步除磷的目的。

收稿日期: 2016-11-01; 修订日期: 2016-12-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51378028)

作者简介: 范军辉 (1990 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为尾水深度脱氮除磷技术, E-mail: fhjahyq@163.com

* 通信作者, E-mail: haoruxia@bjut.edu.cn

温度是影响微生物生命活动的重要因素之一。在一定温度范围内,随温度升高胞内酶活性、细胞膜的流动性逐渐增强,微生物种群数量增多^[8]。赵文莉等^[9]研究发现,作为反硝化滤池滤料的玉米芯表面主要附着纤维素类降解菌和反硝化细菌。玉米芯中的纤维素、半纤维素被纤维素类降解菌分解成小分子有机物,为异养反硝化细菌脱氮提供有机碳源。有研究表明^[10,11],温度对纤维素降解和反硝化脱氮过程影响较大。目前,关于温度对纤维素类降解菌和反硝化细菌影响差异的研究鲜有报道。因此,了解纤维素类降解菌和反硝化细菌对温度变化的敏感程度,掌握纤维素类物质作为碳源进行反硝化脱氮时的适宜温度,可为更好地利用纤维素碳源提供理论基础。

本研究针对城市污水处理厂低 C/N 比尾水深度脱氮除磷问题,探究不同温度下 SCSC-S-Fe 复合系统脱氮同步除磷效果,通过扫描电镜 (SEM) 对初始态玉米芯及反应后不同温度下玉米芯表面微生物附着情况,并结合细菌 16S rRNA 基因克隆文库来分析玉米芯表面微生物种群特性,分析了温度对反硝化细菌和纤维素降解细菌影响的敏感程度,以期为城市污水处理厂尾水深度脱氮除磷提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示,SCSC-S/Fe 复合系统主要由异养反硝化脱氮滤柱 (A 柱) 和硫铁填料脱氮除磷滤柱 (B 柱) 组成,均为有机玻璃材质,内径 19 cm,高度 100 cm,有效容积分别为 5 L 和 5.3 L。A 柱填充由尼龙丝网包裹着氢氧化钠处理过的玉米芯,填充高度为 45 cm,其中将玉米芯切割成长宽高约为 3 cm×1 cm×1 cm 的小长方体。B 柱上层装有高度为 50 cm 质量比为 2:3 的粒径为 2~3 mm 硫磺和粒径 3~5 mm 海绵铁复合填料;下层用粒径为 5~8 mm 的石灰石填装作为过滤层,有效高度为 40 cm。A、B 柱水流方式分别为上向流和下向流。

1.2 实验水质

实验用水为在自来水中加入 KNO₃、KH₂PO₄ 模拟城市污水处理厂尾水中的 TN 和 TP 含量,并用 1 mol·L⁻¹ 的 HCl 调节 pH 值。该水水质特征为:ρ (NO₃⁻-N) 33~36 mg·L⁻¹,ρ (TP) 1.4~1.6 mg·L⁻¹,pH 6.8~7.2。

1.3 实验方法与分析指标

反应器采用接种挂膜法启动,接种污泥来自北

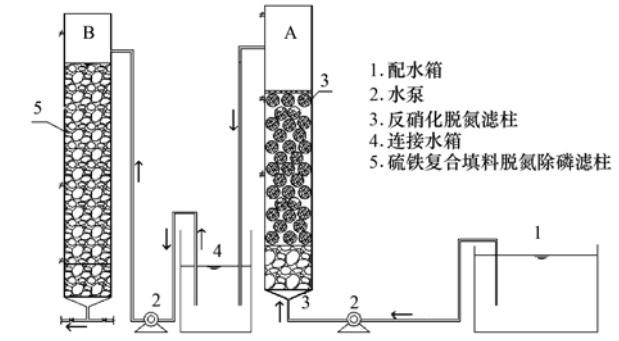


图 1 SCSC-S/Fe 实验装置示意
Fig. 1 Schematic diagram of SCSC-S/Fe experimental device

京某污水处理厂回流污泥,具体参考李素梅等^[12]提供的反应器启动方法。待出水水质各项指标趋于稳定后,启动过程完成。控制水力停留时间 (HRT) 为 9 h 不变,其中 A 柱的 HRT=3 h,B 柱的 HRT=6 h。实验设定 4 个温度梯度:15、20、25 和 30℃。每次变更条件后,稳定一周后再开始对 A 柱进、出水和 B 柱出水取样检测,实验稳定运行 127 d。当温度 20℃ 和 30℃ 做完后,分别提取反应器中部玉米芯表面生物膜,具体微生物 MiSeq 高通量测序过程及分析方法参考郝瑞霞等^[13]提供的操作步骤和分析方法。检测项目包括进出水 NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、NH₄⁺-N、SO₄²⁻、TN、TP、TFE、COD 和 pH 值。表 1 列出分析项目与分析仪器。

表 1 分析项目与仪器	
Table 1 Indicators and analysis apparatus	
项目	分析仪器
NO ₃ ⁻ -N/NO ₂ ⁻ -N/SO ₄ ²⁻	Metrohm861 离子色谱仪(瑞士万通)
NH ₄ ⁺ -N/TP/TFE	722 可见分光光度计(上海欣茂)
TN	Jena multi N/C 3100(德国耶拿)
COD	COD 快速测定仪(连华科技)
pH	PHS-3C pH 计(上海三信)
生物膜提取	中科中佳 HC-2518 离心机
DNA 提取	生工生物(上海)有限公司 DNA 试剂盒
DNA 验证	凝胶成像仪(Bio-bad)
扫描电镜	FEI Quanta 200 扫描电子显微镜 ¹⁾

1) 被微生物利用前的样品用实验配水浸泡 12 h 后进行扫描电镜分析;被微生物利用后的样品直接进行扫描电镜分析表面形态及微生物特性

2 结果与讨论

2.1 不同温度下复合系统脱氮除磷效果

2.1.1 反硝化脱氮效果及分析

图 2 为不同温度下该系统 NO₃⁻-N 及 TN 去除情况。从中可知,温度从 15、20、25℃ 升高 30℃ 时,系统 TN 平均去除率分别为 78.88%、88.62%、90.43% 和 92.70%;NO₃⁻-N 去除率变化不明显;系

统出水 NO_3^- -N浓度从 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右逐渐降低到 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水 NO_2^- -N浓度从 $3.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐渐降低到 $0.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, NH_4^+ -N浓度从 $3.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐渐降低到 $2.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右;A柱TN去除量随温度升高逐渐增加,从 $4.58 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 增加到 $6.91 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 左右,B柱TN去除量变化不明显.数据表明,温度从 15°C 升高到 20°C 时,系统TN去除率增加10%,从 20°C 升高到 30°C 过程中变化不明显;出水中的氮主要以 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N形式存在;A、B柱共同作用将系统内硝酸盐氮去除,A柱TN

去除量随温度升高逐渐增加.

SCSC-S/Fe复合系统中存在异养反硝化、硫自养反硝化、氢自养反硝化和零价铁的化学还原作用等脱氮作用.硫自养反硝化、氢自养反硝化和零价铁的还原作用可以有效弥补异养反硝化过程中碳源的不足.有研究表明^[14,15],在反硝化脱氮过程中,多种脱氮作用混合条件下系统的脱氮能力比单一反硝化作用更强.因此,SCSC-S/Fe复合系统具有高效的反硝化脱氮效率.

2.1.2 除磷效果

图3为该系统在不同温度下除磷情况.从中可知,温度逐渐升高过程中,系统TP平均去除率从 15°C 的82.95%逐渐升高到 30°C 的89.15%,出水TP浓度从 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右;A柱占系统除磷比例的10%,B柱占90%左右.数据表明,SCSC-S/Fe复合系统具有较高的除磷效率,TP去除率随温度升高而增加,系统中的磷主要在B柱内去除.

2.2 玉米芯表面SEM分析

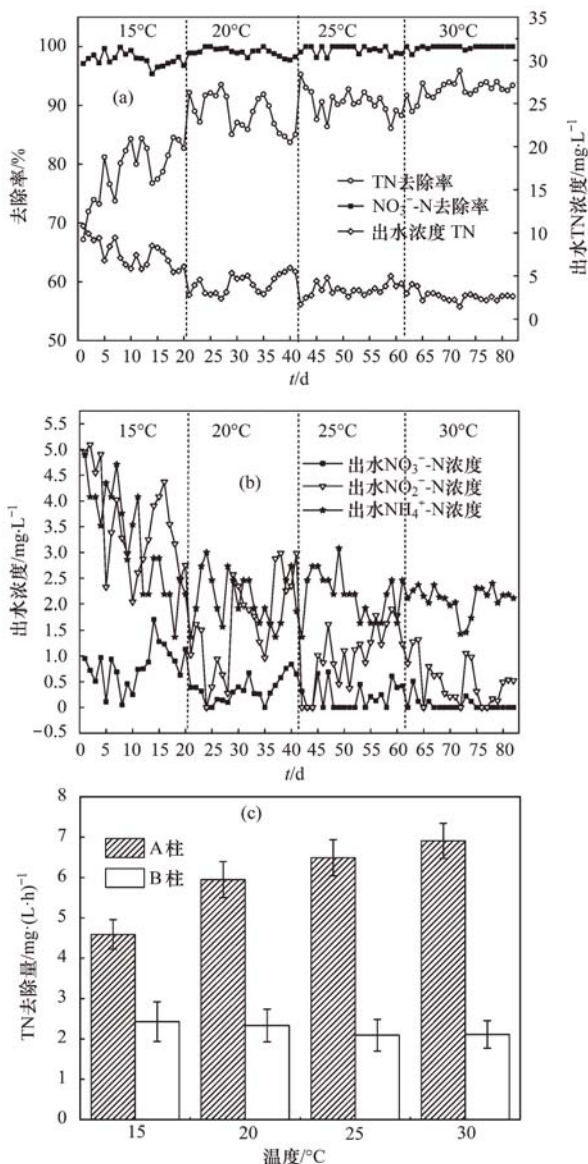
为了探究玉米芯表面微生物附着特性及对比其表面反应前后的变化,对初始玉米芯及反应后不同温度的玉米芯表面进行扫描电子显微镜(SEM)分析.

根据权晓琴等^[16]的研究,玉米芯横截面的显微结构主要由内部的纤维管束和外部表层结构组成,其中纤维管束主要由纤维素和半纤维素组成,而外部表层主要由木质素和纤维素构成.图4为初始态玉米芯及内外组织挂膜反应后的扫描电镜图.对比图4(a)和4(b)可知, 30°C 时微生物已将玉米芯内部纤维管束分解为细丝状,其周围组织附着大量球状微生物,也有少量的杆状微生物,说明玉米芯纤维管束有利于微生物附着分解.从图4(c)和4(d)可知,玉米芯表层组织均匀附着球状微生物,将玉米芯表面降解为一些孔洞, 30°C 时表层附着的微生物和孔洞数量要比 20°C 时多, 30°C 时玉米芯表层有些地方已被微生物分解成较大的孔洞.据报道^[17,18],反硝化细菌和纤维素类降解菌均以杆状、球状微生物为主,本研究中玉米芯表面微生物存在形态与文献报道基本一致.除此之外,对比玉米芯表层和内部组织的生物降解程度可知,玉米芯内部纤维管束结构更易于微生物降解.因此玉米芯作碳源时应将其切割纤维管束暴露出来.

2.3 微生物种群特性分析

2.3.1 样品合理性分析

为了更好地分析温度对纤维素类降解菌和反硝



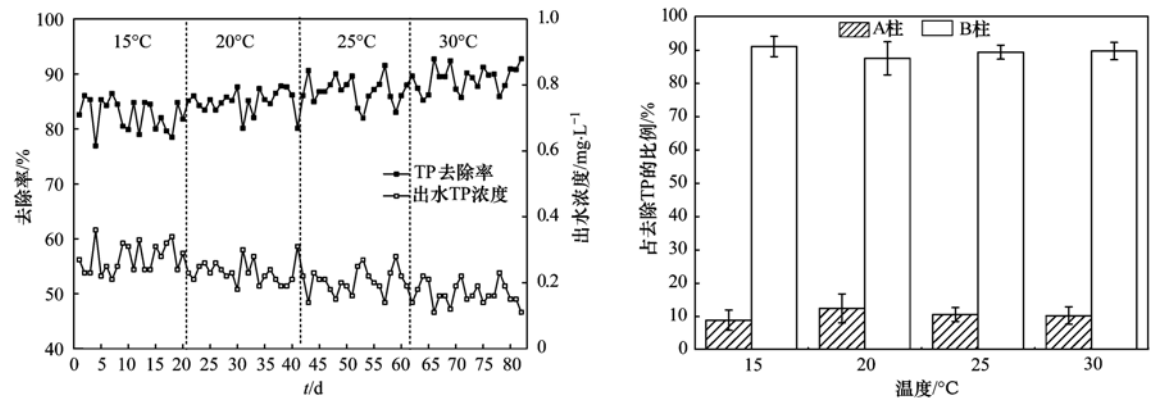
(a) 系统 TN、 NO_3^- -N 去除率及出水 TN 浓度;

(b) 系统出水 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 浓度;

(c) A、B 柱 TN 去除量

图2 SCSC-S-Fe 复合系统不同温度下硝酸盐及总氮去除情况

Fig. 2 NO_3^- -N and TN removal of SCSC-S-Fe at different temperatures



(a) 系统 TP 去除率及出水 TP 浓度；(b) A、B 柱对系统除磷的贡献比例

图 3 SCSC-S/Fe 复合系统除磷情况

Fig. 3 Phosphorus removal of SCSC-S/Fe

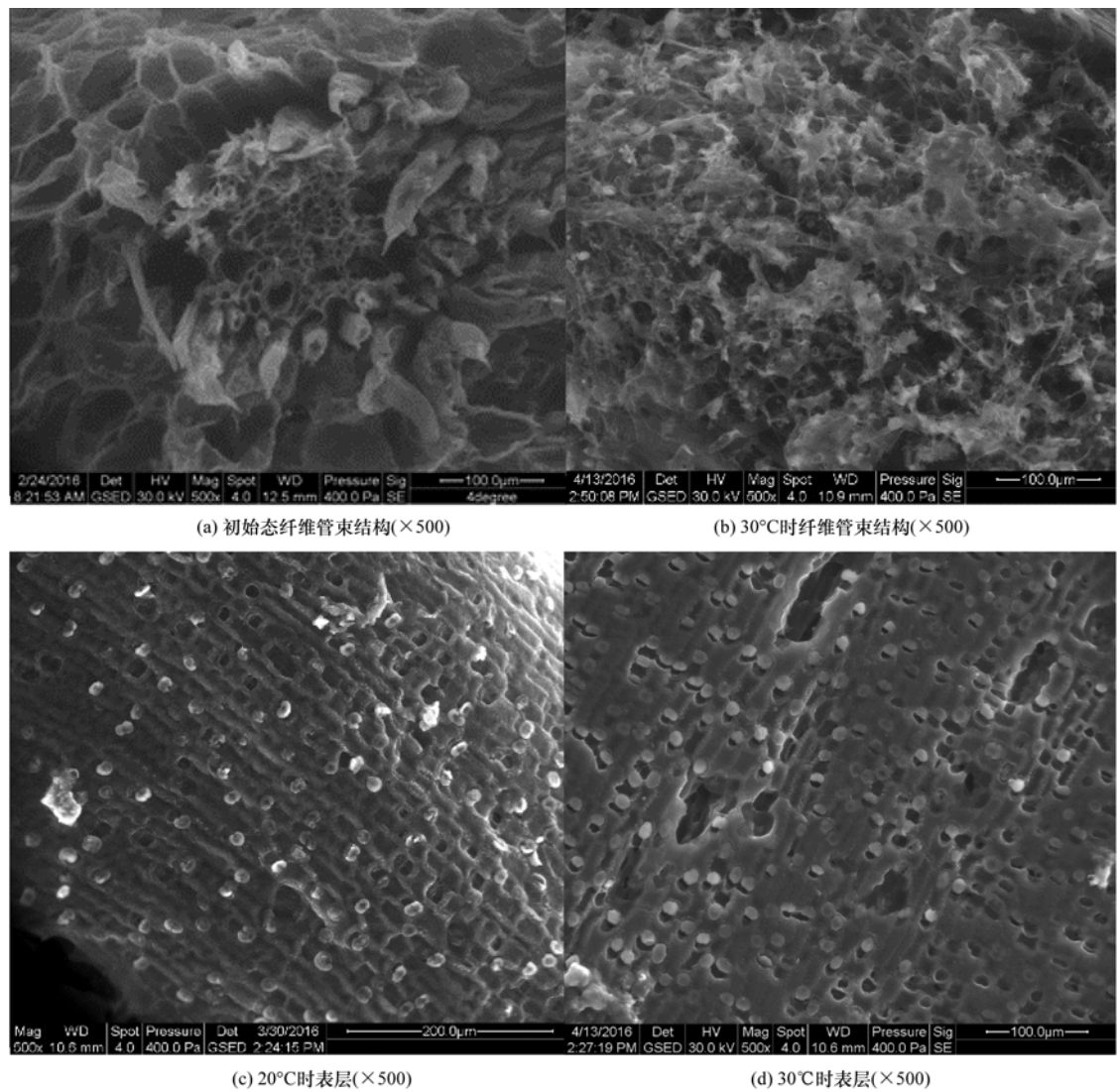


图 4 反应前后玉米芯扫描电镜图片

Fig. 4 SEM images of corncob before and after denitrification

化细菌敏感程度,分别在 20℃ 和 30℃ 条件下提取玉米芯表面生物膜,运用细菌 MiSeq 高通量测序技术,分别获得25 827和31 272条优化序列,将优化后的序列在相似性为 97% 条件下归为一个操作单元

(OTU), 分别得到 250 和 376 个 OTUs. 常用覆盖度指数和样品稀释 Shannon 曲线来表征样品取样的合理性. 覆盖度指数越大表明序列被检测出来的概率越高; 稀释曲线随着测序序列越趋向平坦越表明取样合理. 本研究样品的覆盖度指数均为 0.998 048, 样品的稀释曲线如图 5 所示, 结果表明本研究中样品合理.

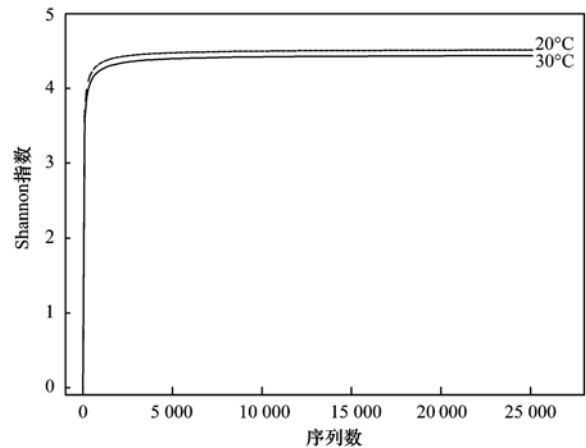


图 5 样品的 Shannon 曲线
Fig. 5 Shannon curves of sample

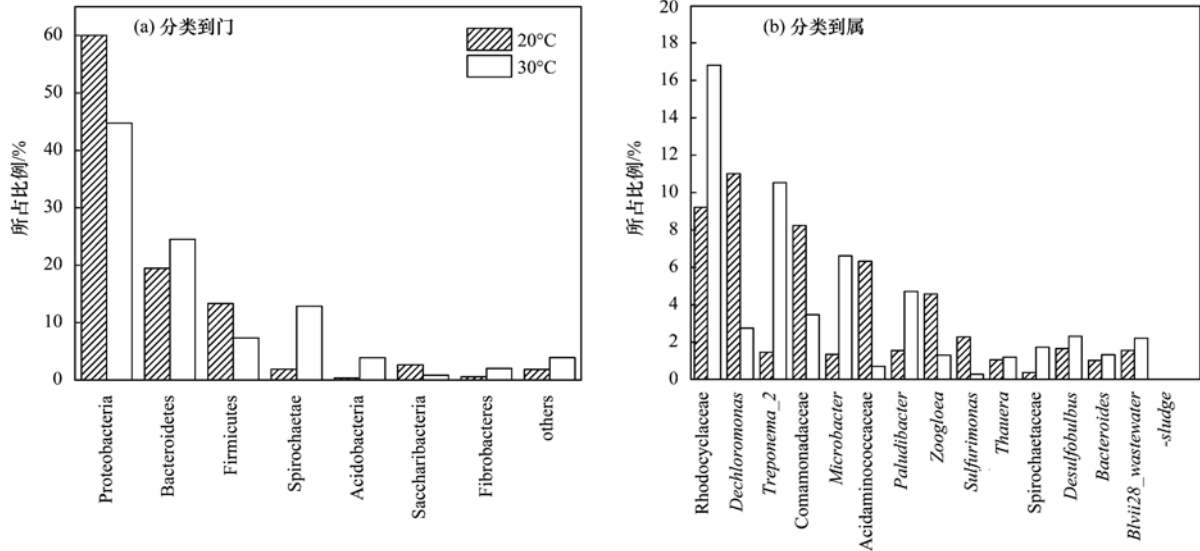


图 6 A 柱内微生物分布情况
Fig. 6 Distribution of microorganisms in A column

中含有纤维素酶可以分解纤维素, 其相对丰度分别为 0.56% 和 2.0%. 数据表明, 30°C 条件下降解纤维素、半纤维素有关的菌属占已知细菌菌属的 43.22%, 比 20°C 时高出 11.01%; 30°C 条件下与反硝化有关菌属占已知细菌菌属的 52.03%, 比 20°C 下降了 21.26%. 下文将从细菌属水平更详细地探讨温度对微生物种群特性的影响.

图 6(b) 为微生物在属水平特性分布情况, 根据

2.3.2 微生物种群特性分析

为得到每一种微生物的详细信息, 将得到的 OTUs 与 Silva 库对比聚类, 结合分类学分析方法, 分别在门 (phylum) 和属 (genus) 分类水平下聚类分析样本群落特性, 其结果如图 6 所示.

从图 6(a) 可知, 样品分类后共得到 6 种已知菌门, Proteobacteria (变形菌门) 在 20°C 和 30°C 条件下均为比例最大的菌门, 其相对丰度分别为 60% 和 44.72%, 变形菌门中大部分微生物趋向于在厌氧环境下通过分解有机物进行反硝化脱氮过程^[19~21]; Bacteroidetes (拟杆菌门) 中大多数细菌可以将纤维素降解成可溶性糖类^[9], 其相对丰度分别为 19.46% 和 24.53%; Firmicute (厚壁菌门) 中大多数细菌可以参与污泥反硝化脱氮过程^[22], 其相对丰度分别为 13.29% 和 7.31%; Acidobacteria (酸杆菌门) 相对丰度分别为 0.31% 和 3.85%, 这类细菌可以将纤维素、半纤维素降解成可溶性糖类和有机酸^[23]; Spirochaetae (螺旋菌门) 是一类可以专一降解半纤维素的细菌^[9], 其相对丰度分别为 1.88% 和 12.84%; Fibrobacteres (纤维杆菌门) 细菌细胞周质

现有文献报道具有降解纤维素或反硝化脱氮作用相关的菌属, 其功能及所占的比例如表 2 所示. 玉米芯表面生物膜中与反硝化脱氮有关的主要菌种包括: Rhodocyclaceae (红环菌科)、Dechloromonas 菌属、Comamonadaceae (丛毛单胞菌科)、Zoogloea (动胶菌属)、Thauera (陶厄氏菌) 和 Blvii28_wastewater-sludge_group 菌属^[14, 24~27], 在 20°C 时这些菌属占已知微生物菌属的 35.63%, 比 30°C 时所占比例高出

7.88%。生物膜中与纤维素降解有关的主要有 *Treponema_2* 菌属、*Paludibacter* (沼杆菌属)、*Bacteroides* (拟杆菌属) 和 *Spirochaetaceae* (螺旋体科)^[9,28~30], 在 20℃ 时其所占比例为已知菌属的 4.42%, 比 30℃ 时低 13.87%。

可见, 温度从 20℃ 升高到 30℃ 时, 反硝化细菌所占已知微生物菌属的比例降低, 纤维素类降解菌所占的比例增加, 表明降解纤维素类细菌随温度升高比反硝化细菌增长更快, 受温度影响更大。

表 2 样本中主要菌属的功能及其所占比例

Table 2 Function and proportion of the main genera in sample		菌属(科)比例/%	
细菌(属水平)	功能	20℃	30℃
Rhodocyclaceae(红环菌科)	反硝化, 聚磷功能	9.22	16.81
<i>Dechloromonas</i>	反硝化聚磷功能	11.00	2.75
<i>Treponema_2</i> (密螺旋体属)	纤维素降解	1.47	10.53
Comamonadaceae(丛毛单胞菌科)	异养或氢自养反硝化	8.23	3.48
<i>Microbacter</i> (微杆菌属)	降解有机物	1.35	6.61
Acidaminococcaceae(氨基酸球菌科)	反硝化	6.33	0.72
<i>Paludibacter</i> (沼杆菌属)	纤维素降解	1.55	4.71
<i>Zoogloea</i> (动胶菌属)	异养反硝化	4.57	1.30
<i>Desulfobulbus</i> (脱硫盒菌属)	促进金属腐蚀	1.66	2.32
<i>Blvii28_wastewater-sludge_group</i>	可能与反硝化有关	1.56	2.21
<i>Sulfurimonas</i> (硫单胞菌属)	硫自养或氢自养反硝化	2.29	0.28
<i>Bacteroides</i> (拟杆菌属)	纤维素降解	1.02	1.32
<i>Thauera</i> (陶厄氏菌)	反硝化	1.06	1.20
<i>Spirochaetaceae</i> (螺旋体科)	纤维素降解	0.38	1.73

2.3.3 温度对系统内具有除磷作用微生物的影响

玉米芯表面附着具有反硝化聚磷作用的 *Rhodocyclaceae* 菌科和 *Dechloromonas* 菌属, 可见 A 柱依靠生物除磷作用将磷去除, 生物除磷作用包括反硝化聚磷作用和微生物生长代谢吸收作用。如表 2 所示, 在 20℃ 和 30℃ 条件下, *Rhodocyclaceae* 菌科和 *Dechloromonas* 菌属所占比例变化不大, 分别为 20.22% 和 19.56%。可见, 温度从 20℃ 升高到 30℃ 过程中, 该系统中具有除磷作用的微生物种群所占比例几乎不变。

2.4 反硝化细菌和纤维素降解细菌对温度的敏感程度

从微生物种群特性部分可知, 填装玉米芯的 A 柱存在纤维素类降解菌和反硝化细菌, 纤维素类降解菌将纤维素、半纤维素分解成利于异养反硝化细菌利用的可溶性糖类, 此过程中产生的有机酸有助于维持体系 pH 值稳定^[31,32], 出水 pH 值和 COD 浓度如图 7 所示。

为了探究温度对纤维素类降解菌和反硝化细菌的影响程度大小, 通过纤维素降解产生的 COD 与反硝化消耗的 COD 之间的比例系数 η 进行分析, 即:

$$\eta = \frac{COD_{总}}{COD_{消耗}}$$

其中纤维素降解产生的 COD($COD_{总}$)包括 A 柱进、

出水 COD 的差值(ΔCOD)和反硝化脱氮消耗 COD($COD_{消耗}$), 即 $COD_{总} = \Delta COD + COD_{消耗}$, 以上计算均取每个温度下的平均值。有研究表明^[33,34], 在反硝化系统中异养反硝化脱氮作用大小可以用 COD 的消耗量来表征, 理论上异养反硝化每将 1 g NO_3^- -N 还原成 N_2 需要消耗 2.86 g COD, 如果考虑微生物同化产能和氧化消耗的 COD, 实际上反硝化所需的 C/N 比在 3 以上, 本研究取 C/N 比等于 3, 其计量关系如公式(1)所示。根据图 7 中 A 柱进、出水 NO_3^- -N 浓度差(ΔNO_3^- -N)和公式(1)计算出 A 柱反硝化脱氮过程中 $COD_{消耗}$, 进而计算出 η 值, 结果如图 8(b) 所示。从中可知, 随温度升高 η 值逐渐增

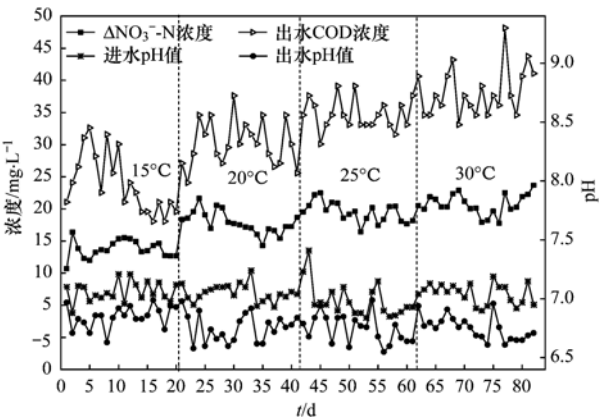
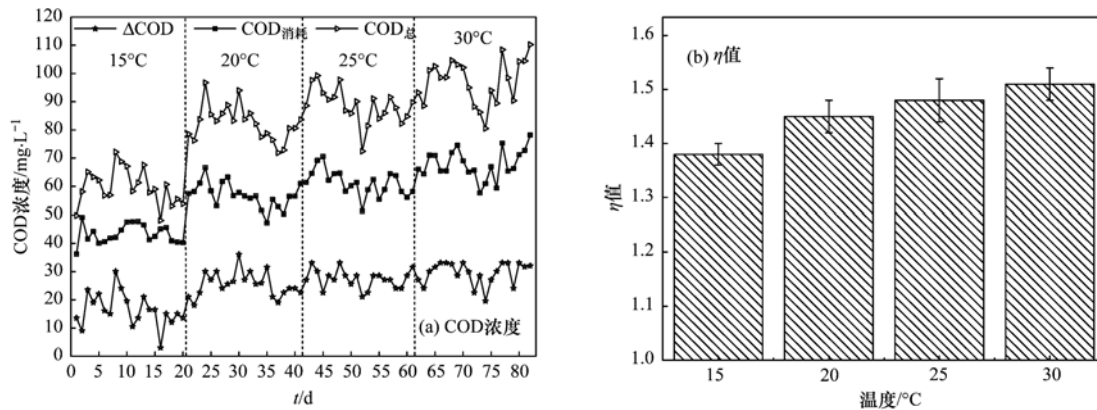


图 7 A 柱 pH 值及出水 COD 浓度
Fig. 7 Effluent COD concentration and pH of A column

图8 A柱COD浓度和 η 值Fig. 8 Effluent COD concentration and η of A column

大,表明随温度升高微生物降解纤维素产生的有机物速率大于反硝化脱氮消耗速率,即纤维素类降解细菌比反硝化细菌随温度升高增长更快、受温度影响更大。

$$\text{COD}_{\text{消耗}} = 3 \times \Delta \text{NO}_3^- - \text{N} \quad (1)$$

3 结论

(1) SCSC-S/Fe 复合系统能高效地将城市污水处理厂低 C/N 比尾水中的氮、磷去除。该系统 TN 去除率随温度升高逐渐增加,温度从 15、20、25℃ 升高到 30℃ 时, TN 平均去除率从 78.88% 增加到 92.70%; TP 去除率随温度升高增加不明显,保持在 82% 以上。

(2) 玉米芯中的纤维管束结构易被微生物分解利用,将玉米芯纤维管束结构切割暴露后便于微生物利用。

(3) 温度从 20℃ 升高到 30℃ 时,与反硝化有关的 Proteobacteria 菌门和 Firmicute 菌门所占比例分别降低了 15.28% 和 5.98%,同时纤维素、半纤维素降解有关的 Bacteroidetes 菌门、Acidobacteria 菌门、Spirochaetae 菌门和 Fibrobacteres 菌门细菌所占比例增加了 11.01%。因此,纤维素类降解细菌比异养反硝化细菌随温度升高增长更快、对温度升高更敏感和受温度影响更大。

(4) 温度从 20℃ 升高到 30℃ 过程中,玉米芯表面与生物除磷作用有关的 Rhodocyclaceae 菌科和 Dechloromonas 菌属占已知菌属的比例从 20.22% 变化到 19.56%。可见,在一定范围内,温度变化对固相纤维素碳源的生物除磷过程影响不大。

参考文献:

[1] 钱易. 污水资源化是解决水危机的有效途径[J]. 北京规划建设, 1996, (4): 5-7.

Qian Y. Wastewater recycling is an effective way to solve water crisis[J]. Beijing planning and construction, 1996, (4): 5-7.

[2] 王鹤立, 陈雷, 梁伟刚, 等. 再生水回用于人工景观水体的水质目标: 策略与技术[J]. 环境科学, 2002, 23(S1): 93-98.

Wang H L, Chen L, Liang W G, et al. Research on strategy and technique of water quality standard for reuse of reclaimed water in scenic water[J]. Environmental Science, 2002, 23(S1): 93-98.

[3] 范军辉, 郝瑞霞, 李萌, 等. 基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制[J]. 环境科学, 2016, 37(11): 4275-4281.

Fan J H, Hao R X, Li M, et al. Phosphorus removal mechanism of sulfur/sponge iron composite fillers based on denitrification[J]. Environmental Science, 2016, 37(11): 4275-4281.

[4] 李斌, 郝瑞霞. 固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1428-1434.

Li B, Hao R X. Comparison and optimization of cellulose carbon source for denitrification filter[J]. Environmental Science, 2013, 34(4): 1428-1434.

[5] 赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 等. 预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 987-994.

Zhao W L, Hao R X, Li B, et al. Effects of pretreatment methods on corncob as carbon source for denitrification[J]. Environmental Science, 2014, 35(3): 987-994.

[6] 徐忠强, 郝瑞霞, 徐鹏程, 等. 硫铁填料和微电流强化再生水脱氮除磷的研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(2): 406-413.

Xu Z Q, Hao R X, Xu P C, et al. Research on enhanced denitrification and phosphorus removal from reclaimed water by using sponge iron/sulfur composite fillers and low electrical current[J]. China Environmental Science, 2016, 36(2): 406-413.

[7] 周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 等. 硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2229-2234.

Zhou Y Q, Hao R X, Wang Z, et al. Effects of sulfur/sponge iron ratio for deep denitrification and phosphorus removal of reclaimed water[J]. Environmental Science, 2016, 37(6): 2229-2234.

[8] 刘凯, 王海燕, 马名杰, 等. 温度对城市污水厂尾水反硝化 MBBR 深度脱氮的影响[J]. 环境科学研究, 2016, 29(6): 877-886.

- Liu K, Wang H Y, Ma M J, *et al.* Influence of temperature on nitrogen removal from wastewater treatment plant effluent by denitrification MBBR[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(6): 877-886.
- [9] 赵文莉, 郝瑞霞, 王润众, 等. 复合碳源填料反硝化脱氮及微生物群落特性[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(10): 3003-3009.
- Zhao W L, Hao R X, Wang R Z, *et al.* Denitrification of composite carbon filler and character of microbial community[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(10): 3003-3009.
- [10] Donovan J M, Molton P M, Demmitt T F. Effect of pressure, temperature, pH, and carbon monoxide on oil yields from cellulose liquefaction[J]. *Fuel*, 1981, **60**(10): 898-902.
- [11] 马娟, 彭永臻, 王丽, 等. 温度对反硝化过程的影响以及 pH 值变化规律[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(11): 1004-1008.
- Ma J, Peng Y Z, Wang L, *et al.* Effect of temperature on denitrification and profiles of pH during the process[J]. *China Environmental Science*, 2008, **28**(11): 1004-1008.
- [12] 李素梅, 郝瑞霞, 孟成成. 三维电极生物膜反应器低温启动试验研究[J]. *中国给水排水*, 2013, **29**(5): 101-105.
- Li S M, Hao R X, Meng C C. Start-up of three-dimensional electrode biofilm reactor at low temperature[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, **29**(5): 101-105.
- [13] 郝瑞霞, 孟成成, 王建超, 等. 三维电极生物膜-硫自养耦合脱氮系统中反硝化细菌多样性研究[J]. *北京工业大学学报*, 2014, **40**(11): 1722-1729, 1740.
- Hao R X, Meng C C, Wang J C, *et al.* Study of denitrifying bacteria in three-dimensional biofilm-electrode reactor and sulfur autotrophic coupled denitrification system[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2014, **40**(11): 1722-1729, 1740.
- [14] Hao R X, Li S M, Li J B, *et al.* Denitrification of simulated municipal wastewater treatment plant effluent using a three-dimensional biofilm-electrode reactor: operating performance and bacterial community[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **143**: 178-186.
- [15] 孟成成, 郝瑞霞, 王建超, 等. 3BER-S 耦合脱氮系统运行特性研究[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(11): 2817-2823.
- Meng C C, Hao R X, Wang J C, *et al.* Study on the performance for a coupled denitrifying system of 3BER-S [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(11): 2817-2823.
- [16] 权晓琴, 金邦荃, 胡珏, 等. 乳熟期甜玉米芯纤维管微结构与成分的比较性研究[J]. *南京师范大学学报(工程技术版)*, 2015, **15**(1): 86-92.
- Quan X Q, Jin B Q, Hu J, *et al.* Comparison study on the change of fiber tube structure and components of sweet corn cob in milk stage [J]. *Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology Edition)*, 2015, **15**(1): 86-92.
- [17] 郑照明, 李泽兵, 刘常敬, 等. 城市生活污水 SNAD 工艺的启动研究[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(4): 1072-1081.
- Zheng Z M, Li Z B, Liu C J, *et al.* The study of SNAD process start-up on domestic wastewater [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(4): 1072-1081.
- [18] Feng C J, Zhang Z J, Wang S M, *et al.* Characterization of microbial community structure in a hybrid biofilm-activated sludge reactor for simultaneous nitrogen and phosphorus removal[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2013, **34**(2): 489-499.
- [19] Shen Z Q, Zhou Y X, Hu J, *et al.* Denitrification performance and microbial diversity in a packed-bed bioreactor using biodegradable polymer as carbon source and biofilm support[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **250-251**: 431-438.
- [20] 陈谊, 孙宝盛, 张斌, 等. 不同 MBR 反应器中硝化菌群落结构的研究[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(1): 69-75.
- Chen Y, Sun B S, Zhang B, *et al.* Nitrifying bacteria structure community of different MBR reactor[J]. *China Environmental Science*, 2010, **30**(1): 69-75.
- [21] Thomsen T R, Kong Y H, Nielsen P H. Ecophysiology of abundant denitrifying bacteria in activated sludge[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2007, **60**(3): 370-382.
- [22] Knowles R. Denitrification[J]. *Microbiological Reviews*, 1982, **46**(1): 43-70.
- [23] Naumoff D G, Dedysh S N. Lateral gene transfer between the *Bacteroidetes* and *Acidobacteria*: the case of α -L-rhamnosidases [J]. *FEBS Letters*, 2012, **586**(21): 3843-3851.
- [24] Wang H Y, Zhou Y X, Yuan Q, *et al.* Bacteria morphology and diversity of the combined autotrophic nitrification and sulfur-carbon three-dimensional-electrode denitrification process[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A-Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2014, **49**(1): 39-51.
- [25] Jean M R, Gonzalez-Rizzo S, Gauffre-Autelin P, *et al.* Two new *Beggiatoa* species inhabiting marine mangrove sediments in the Caribbean[J]. *PLoS One*, 2015, **10**(2): e0117832.
- [26] Shinoda Y, Sakai Y, Uenishi H, *et al.* Aerobic and anaerobic toluene degradation by a newly isolated denitrifying bacterium, *Thauera* sp. strain DNT-1 [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, **70**(3): 1385-1392.
- [27] Lv X M, Shao M F, Li J, *et al.* Metagenomic analysis of the sludge microbial community in a lab-scale denitrifying phosphorus removal reactor[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2015, **175**(7): 3258-3270.
- [28] Bucher B, Poupard J, Parra J P, *et al.* *Borrelia burgdorferi* and tropical spastic paraparesis[J]. *The Lancet*, 1990, **336**(8723): 1135.
- [29] Cardinali-Rezende J, Araújo J C, Almeida P G S, *et al.* Organic loading rate and food-to-microorganism ratio shape prokaryotic diversity in a demo-scale up-flow anaerobic sludge blanket reactor treating domestic wastewater [J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 2013, **104**(6): 993-1003.
- [30] Shen R X, Liu Z D, He Y H, *et al.* Microbial electrolysis cell to treat hydrothermal liquefied wastewater from cornstalk and recover hydrogen: degradation of organic compounds and characterization of microbial community [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, **41**(7): 4132-4142.
- [31] 熊剑锋, 徐华, 阎宁, 等. 梧桐树叶作为反硝化碳源的研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(11): 4057-4061.
- Xiong J F, Xu H, Yan N, *et al.* Leaves of *Platanus orientalis* as the carbon source for denitrification[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(11): 4057-4061.
- [32] 邵留, 徐祖信, 金伟, 等. 以稻草为碳源和生物膜载体去除水中的硝酸盐[J]. *环境科学*, 2009, **30**(5): 1414-1419.
- Shao L, Xu Z X, Jin W, *et al.* Nitrate removal from wastewater using rice straw as carbon source and biofilm carrier [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(5): 1414-1419.
- [33] 唐蕾, 李彭, 左剑恶, 等. 缓释碳源滤料滤池用于二级出水

的深度脱氮[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3526-3531.

Tang L, Li P, Zuo J E, *et al.* Advanced nitrogen removal using innovative denitrification biofilter with sustained-release carbon source material [J]. Environmental Science, 2013, **34**(9): 3526-3531.

[34] 胡传侠, 杨昌柱, 杨群, 等. 固定化三维电极-生物膜法去除

污水中硝酸盐氮[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(2): 83-87.

Hu C X, Yang C Z, Yang Q, *et al.* Study on removal of nitrate from secondary effluent by immobilized three-dimension electrode-biofilm reactor[J]. Environmental Science & Technology, 2008, **31**(2): 83-87.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用1, 1.1, 1.1.1的形式,左起顶格书写,3级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩2格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市2871信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@rcees.ac.cn;网址:www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuahu, Shennongjia, China	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China	ZHANG Qiu-qi, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper(II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO ₃ ⁻ -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark ...	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe ⁽⁰⁾ -activated Carbon and Its Influencing Factors	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitrification Systems with Two Different Inhibition Strategies	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthen Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N ₂ O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N ₂ O Emissions from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suyi Lake	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetirizine to Loessial Soil Amended with Biochar	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb ²⁺ and Cd ²⁺ from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C ₃ N ₄ /BiOBr Composite Photocatalyst	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)