

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,邹晓东 (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,张杰,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,陈耕南 (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 肖骁,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)

NO₃⁻-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 *Escherichia coli* 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)

树脂基纳米钛铝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 闰刚,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 *Ochrobactrum* 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 *Arthrobacter* 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 N₂O 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 N₂O 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)

牛粪源粪炭及其生物炭对 Pb²⁺、Cd²⁺ 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)

C₃N₄/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)

NO₃⁻-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¹, 李瑶^{1*}, 张莹^{1,2}, 张翔凌¹

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 武汉 430070; 2. 中国市政工程西北设计研究院有限公司武汉分院, 武汉 430056)

摘要: 为了将污水厂尾水作为再生水进行利用, 常常需要对尾水进行深度脱氮, 针对尾水的水质特征, 在深度脱氮时常常需投加碳源。试验采用树皮作为填料, 兼作脱氮的缓释碳源, 进行树皮填料人工湿地深度脱氮模型试验, 研究进水 NO₃⁻-N 负荷对反硝化和树皮释放碳源的影响。结果表明, 树皮填料人工湿地可稳定脱氮; 反硝化速率遵循 Monod 关系式, 随进水 NO₃⁻-N 负荷增大而递增, 饱和常数 $K_s = 19.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 硝氮去除率随进水 NO₃⁻-N 负荷增大而减小; 在树皮填料人工湿地运行早期, 树皮释碳总量、树皮释碳速率随进水 NO₃⁻-N 负荷增大而递增, 与进水 NO₃⁻-N 均呈线性正相关; 树皮静态释碳速率为 $0.2 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$, 与腐朽木等中空松散的植物碳源相比, 碳源缓释性能较好, 释碳周期较长, 是良好的缓释碳源。

关键词: 人工湿地; 树皮; NO₃⁻-N 负荷; 反硝化; 释放碳源

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-1898-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.201609220

Effects of NO₃⁻-N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark

JIANG Ying-he¹, LI Yao^{1*}, ZHANG Ying^{1,2}, ZHANG Xiang-ling¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Wuhan Branch, Northwest Design and Research Institute Co., Ltd., China Municipal Engineering, Wuhan 430056, China)

Abstract: The reuse of tailwater as recycled water requires an advanced nitrogen removal treatment, during which carbon source is added based on the tailwater quality. This study conducted an advanced nitrogen removal model test in constructed wetland to evaluate the effects of influent NO₃⁻-N loading on denitrification and carbon releasing. In the constructed wetland, bark was used as filler and carbon source for nitrogen removal. The results showed that nitrogen removal was steady in the constructed wetland filled with bark. Denitrification velocity followed the Monod equation, and it increased as the influent NO₃⁻-N loading increased. The saturation constant K_s was $19.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. NO₃⁻-N removal rate decreased as the influent NO₃⁻-N loading increased. During the early periods of operating the constructed wetland filled with bark, the carbon releasing amount and velocity increased as the influent NO₃⁻-N loading increased. Both factors were positively linearly correlated with the influent NO₃⁻-N loading. The static carbon releasing velocity was $0.2 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$. Compared with the hollow and loose plant carbons, such as rotten wood, bark had a better performance and a longer cycle of carbon releasing, which made bark a good slow-release carbon source.

Key words: constructed wetland; bark; NO₃⁻-N loading; denitrification; carbon source releasing

随着全球人口数量的不断增加和经济的不断发展, 水环境日渐恶化, 全球水资源日趋紧缺。在解决水资源短缺的众多工程方案中, 相对于海水淡化和远距离引水等工程, 污水回用具有较高的经济性和稳定性^[1]。但是, 目前大多数污水厂即使采用前置缺氧生物强化脱氮工艺, 出水总氮仍偏高, 为了进行再生水利用, 一般需对原污水厂尾水进行深度脱氮。

污水厂尾水脱氮技术常采用生化法, 主要工艺有生物反硝化滤池(DNBF)、移动床生物膜反应器(MBBR)和人工湿地等^[2]。人工湿地因其建造及运行费用较低、氮磷去除效率较高、耐冲击负荷强等特点而成为尾水深度处理的主要工艺之一^[3]。人工湿地对污水厂尾水进行反硝化时, 由于尾水中 BOD

一般很低, 往往需要投加外加碳源。目前常用的外加碳源有甲醇、乙醇、乙酸、葡萄糖、果糖等一类的液体碳源和植物秸秆、干草、木屑、香蒲、棉花、报纸、丝瓜络、玉米芯等含纤维素类物质的固态碳源物质^[4~27]。本研究选用树皮作为外加碳源, 树皮价格低廉, 取材容易, 碳源含量高, 表面粗糙, 微生物易附着。此外, 树皮兼作人工湿地系统的填料, 与其它固体碳源相比, 坍塌和堵塞的概率较小, 且易于整体更换。本文将着重研究进水 NO₃⁻-N 负荷对人

收稿日期: 2016-09-27; 修订日期: 2016-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(31670541)

作者简介: 姜应和(1963~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为水污染控制理论与应用, E-mail: jyhe123@163.com

* 通信作者, E-mail: 1170121644@qq.com

工湿地反硝化和释碳速率的影响。

1 材料与方法

1.1 试验装置

人工湿地模型是采用有机玻璃制成的圆柱体,总高度为 40 cm,出口的高度为 30 cm,距反应器底部 2 cm 处设穿孔承托板,树皮填充的高度为 28 cm,品种是杉树皮。装置的内径为 11 cm,总体积为 3.8 L,有效体积为 2.7 L。人工湿地模型系统如图 1 所示。

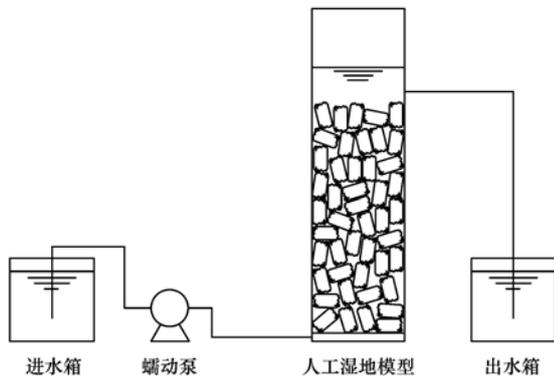


图 1 人工湿地模型系统

Fig. 1 Constructed wetland model system

1.2 树皮填料

将树皮洗净风干加工成 $1\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的小块,装填至人工湿地模型中,装填高度为 28 cm,装填体积为 $2\ 660\text{ cm}^3$,取出放置在 100°C 的烘箱内干燥 2 h,称得树皮干重为 212.2 g。则树皮填料的堆积密度 ρ 为 $0.08\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,即 $0.08\text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

1.3 试验方案设计

首先,对人工湿地系统的树皮填料进行挂膜。先将树皮填料装入容器中,然后向其中投加武汉市龙王嘴污水处理厂的回流污泥用作污泥接种,使用搅拌机搅拌,使树皮悬浮在污泥中。每天静沉一段时间后排上清液,并补充同等体积的营养液。营养液的主要成分为 $\text{NaAc } 200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NaNO}_3\ 70\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $\text{KH}_2\text{PO}_4\ 20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。8 d 后树皮变黑并附着生物膜,表明挂膜成功。

然后,对树皮填料上的生物膜进行驯化。采用蠕动泵控制进水流量为 $2.37\text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$,即人工湿地的 HRT 为 1.12 d。微生物驯化过程分为 4 个阶段:第一阶段进水水质与挂膜期相同;第二阶段进水中 NaAc 减半降至 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NaNO_3 不变;第三阶段进水中 NaAc 再减半至 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而 NaNO_3 提高到 $140\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;第四阶段在进水中停止额外投加碳

源,即 NaAc 降为 $0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NaNO_3 保持在 $140\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

最后,进行试验研究。改变进水中 NO_3^- -N 浓度,研究 NO_3^- -N 负荷对反硝化和树皮释碳速率的影响。

1.4 分析方法

每天测定人工湿地系统的进出水水质。主要指标的测定方法为:硝氮浓度采用紫外分光光度法,亚硝氮浓度采用 N -(1-萘基)-乙二胺分光光度法,COD 采用重铬酸钾法,DO 采用膜电极法。分析时所用药品均为分析纯试剂。

2 结果与讨论

2.1 人工湿地微生物驯化

树皮填料人工湿地微生物驯化延续了 1 个月左右,以 $1\text{ mg NaAc} = 0.727\text{ mg COD}$ 、 $1\text{ mg NaNO}_3 = 0.165\text{ mg NO}_3^-$ -N 进行换算,其试验结果如图 2 所示。一般认为水中 $\text{C}/\text{N} > 3 \sim 5$ 时碳源充足,不需外加碳源^[28]。在第一、二阶段,碳源充足,反硝化反应充分,硝氮去除率接近 100%;在第三阶段,原水中额外投加碳源量减少, NO_3^- -N 增加,碳源相对不够充足, NO_3^- -N 去除率有所降低;在第四阶段,进水中额外投加碳源为 $0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,虽然配制原水的自来水中有一定量的有机物,但原水中 COD 值非常低,人工湿地 NO_3^- -N 去除率仍可稳定在 43% 左右。第四阶段的试验结果表明树皮能够释放出被微生物利用的碳源,在原水中碳源严重不足的情况下,树皮填料人工湿地可以稳定地进行反硝化反应,具备补充碳源进行深度脱氮的可行性。

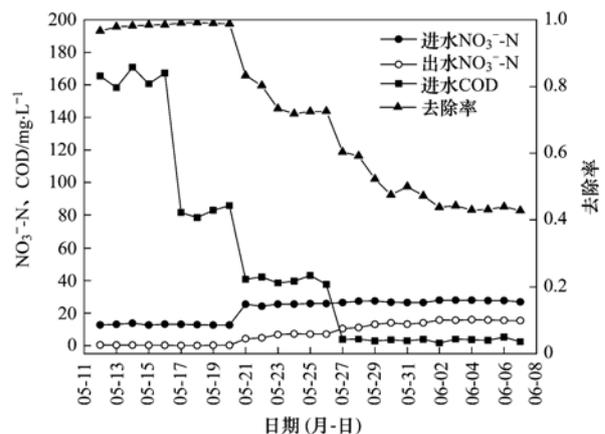


图 2 人工湿地驯化期间水质变化

Fig. 2 Variation of water quality in constructed wetland during acclimation period

2.2 NO_3^- -N 负荷对人工湿地反硝化的影响

人工湿地稳定启动后,HRT 恒定为 1.12 d。原水

中不额外投加碳源,硝氮负荷为 $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和其他硝氮负荷时,进水分别采用蒸馏水和自来水配制. 改变进水中 NO_3^- -N 浓度,分别为 32.08、27.85、20.59、11.52 和 $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,试验结果如图 3 所示. 从中可知,随着 NO_3^- -N 负荷的逐渐降低,去除率会逐渐升高,从最初的 43% 左右提高到最终的 57% 左右.

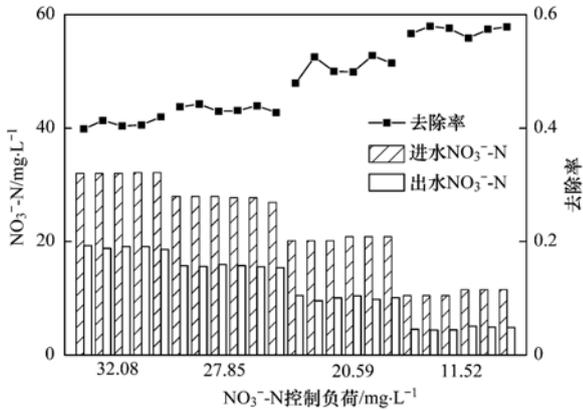


图 3 不同 NO_3^- -N 负荷控制条件下反硝化结果

Fig. 3 Results of denitrification under different NO_3^- -N controlled loading

应用 Monod 方程构建人工湿地内微生物的脱氮反应动力学关系式如式(1)所示^[3].

$$-\frac{dS}{dt} = v_{\max} \frac{XS}{K_S + S} = k \frac{S}{K_S + S} \quad (1)$$

式中, S 指反应器中的 NO_3^- -N 浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); K_S 指饱和常数 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); X 指微生物浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); v_{\max} 指底物最大比降解速率, $k = Xv_{\max}$ [$\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$]. 将式(1)两边同时进行定积分得:

$$S_0 - S_e = -K_S \ln \frac{S_0}{S_e} + kt \quad (2)$$

将 $\ln(S_0/S_e)$ 作为自变量 X_1 , $S_0 - S_e$ 作为因变量 Y_1 , 进行线性拟合, 结果如图 4 所示. 从中可知, 斜率为 -19.10 , 即 $K_S = 19.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 截距 kt 为 23.12 , 因 $\text{HRT} = 1.12 \text{ d}$, 则 $k = 23.12/1.12 = 20.64 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$. 将 k 和 K_S 代入式(1), 可得装置内的反硝化速率为:

$$-\frac{dS}{dt} = k \frac{S}{K_S + S} = \frac{20.64S}{19.10 + S} \quad (3)$$

由式(3)可知, 人工湿地的反硝化速率随 NO_3^- -N 浓度增大而增大. 试验所得不同 NO_3^- -N 负荷时的平均反硝化速率与式(3)计算所得的反硝化速率对比如表 1 所示, 结果表明两者误差非常小.

2.3 NO_3^- -N 负荷对树皮释放碳源的影响

Li 等^[29] 认为树皮释放的碳源总量由 3 部分组成.

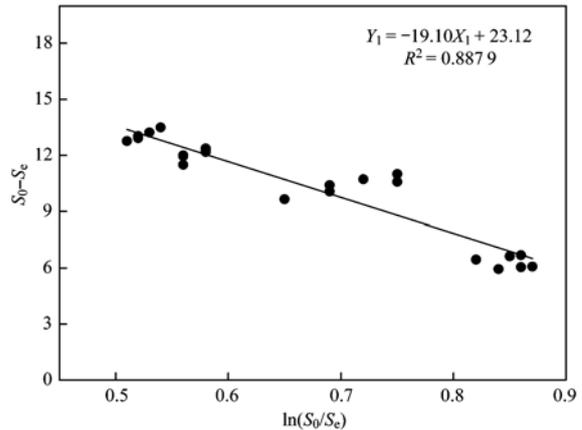


图 4 $\ln(S_0/S_e)$ 与 $S_0 - S_e$ 关系拟合

Fig. 4 Fitting diagram of relationship between $\ln(S_0/S_e)$ and $S_0 - S_e$

表 1 不同 NO_3^- -N 负荷控制条件下反硝化速率

Table 1 Velocity of denitrification under different

NO_3^- -N controlled loading			
NO_3^- -N 负荷 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	实测反硝化速率 / $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$	计算反硝化速率 / $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$	误差 /%
32.08	12.94	12.94	0
27.85	12.23	12.24	0.08
20.59	10.69	10.71	0.19
11.52	7.55	7.76	2.78

第一部分因水中含溶解氧部分有机物被微生物好氧代谢, 其值等于进水 DO 值, 记作 S_1 . 本阶段试验时间段为 7 月 5 日 ~ 8 月 6 日, 进水水温变化不大, 维持在 $22^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 左右. 根据笔者在其它试验的实测分析结果, 在该温度范围内取进水 DO 均值为 $8.55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 较为合适, 故 S_1 取 $8.55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

第二部分用作反硝化碳源, 金雪标等^[30] 认为反硝化去除 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 需要消耗的 COD 按式(4)计算:

$$S_2 = 2.86(\Delta \text{NO}_3^- \text{-N}) + 1.71(\Delta \text{NO}_2^- \text{-N}) \quad (4)$$

式中, S_2 指反硝化消耗的碳源量 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); ΔNO_3^- -N 指进水中硝氮的差值 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); ΔNO_2^- -N 指进水中亚硝氮的差值 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 通过检测, 进出水中的 NO_2^- -N 基本没有变化, 其差值可忽略不计. 则, 式(4)可简化为:

$$S_2 = 2.86(\Delta \text{NO}_3^- \text{-N}) \quad (5)$$

第三部分随出水流出, 其值等于出水 COD 与进水 COD 的差值, 记作 S_3 .

$$S_3 = \Delta \text{COD} \quad (6)$$

式中, ΔCOD 指出水 COD 与进水 COD 的差值 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

此外, 根据生物处理原理, 笔者认为还有第四部

分,该部分是被微生物生长同化所消耗的 COD,记作 S₄,树皮释放碳源的总量为 S_C (S_C = S₁ + S₂ + S₃ + S₄).

因反应过程中树皮上生物净增长量较少,故 S₄ 也可以忽略不计. 故 S_C 可按式(7)计算:

$$S_C = 8.55 + 2.86(\Delta \text{NO}_3^- - \text{N}) + \Delta \text{COD} \quad (7)$$

试验过程中不同阶段 S_C 计算结果如图 5 所示,其中“消耗 COD”为反硝化消耗的 COD,“总 COD”为树皮释放碳源的总量 S_C. 硝氮负荷为 0 mg·L⁻¹ 时,进水采用蒸馏水配制,进水 COD 为零;其他硝氮负荷条件下,进水采用自来水配制,进水 COD 处于 3 ~ 5 mg·L⁻¹.

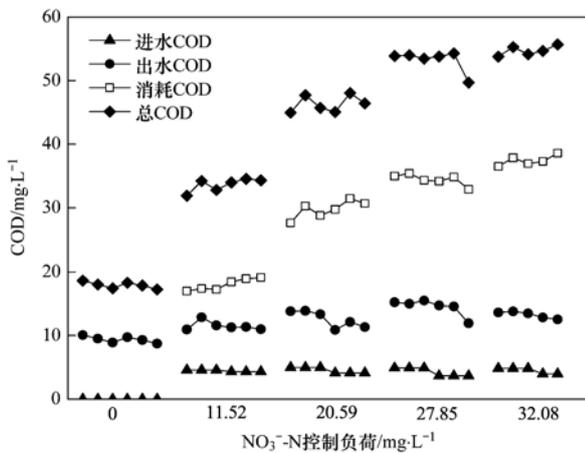


图 5 不同 NO₃⁻-N 负荷控制条件下树皮释碳量

Fig. 5 Carbon releasing quantity of bark under different NO₃⁻-N controlled loading

由图 5 可知,树皮释放碳源的总量随着 NO₃⁻-N 负荷的增加而增大,当进水 NO₃⁻-N 浓度为 32.08 mg·L⁻¹ 时,树皮释放的总碳量最高可达 55.69 mg·L⁻¹;当进水中不含 NO₃⁻-N 时,树皮释放出 17.50 mg·L⁻¹ 左右的碳源. 出水中的 COD 含量随着 NO₃⁻-N 负荷的减小略有降低,但变化幅度不大,在整个试验过程中维持在 8 ~ 15 mg·L⁻¹. 假设树皮释碳量 (Y₂) 与进水 NO₃⁻-N 负荷 (X₂) 为线性关系,拟合结果如图 6 所示.

由图 6 可知,线性拟合效果较好,即认为树皮释碳量与进水 NO₃⁻-N 负荷呈线性关系的基本假定成立. 对于以树皮为填料的人工湿地,进水 NO₃⁻-N 浓度越高,所释放的碳源量越多,释碳量与 NO₃⁻-N 负荷具有良好的适应性.

树皮的释碳速率是指单位树皮干重在单位时间内所释放的碳源量,记为 v,可按式(8)计算:

$$v = QS_C/m \quad (8)$$

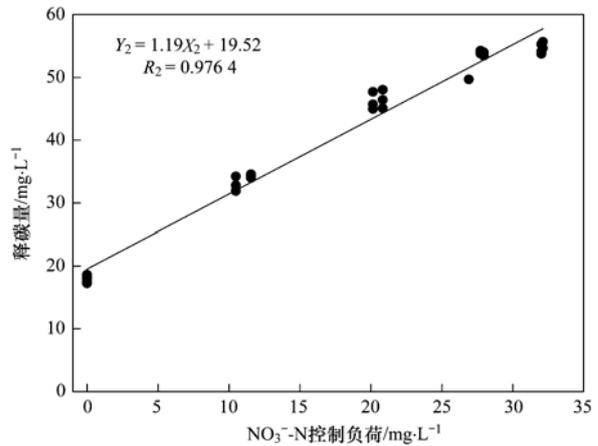


图 6 树皮释碳量与进水 NO₃⁻-N 关系拟合图

Fig. 6 Fitting diagram of relationship between carbon releasing and NO₃⁻-N loading

式中, v 指树皮的释碳速率 mg·(g·d)⁻¹; Q 指反应器处理流量 (L·d⁻¹); m 指反应器内树皮的干重 (g), m = ρ · V, 经检测树皮堆积密度 ρ 为 0.08 g·cm⁻³, 即 0.08 t·m⁻³, V 为树皮填料装填体积. 式(8)可改写为式(9),以便推广应用.

$$v = QS_C/(\rho \cdot V) \quad (9)$$

本试验 Q = 2.37 L·d⁻¹, V = 2 660 cm³, 则树皮释碳速率计算结果如表 2 所示.

表 2 不同 NO₃⁻-N 负荷控制条件下树皮释碳情况¹⁾

Table 2 Results of carbon releasing of bark under different NO₃⁻-N controlled loading

NO ₃ ⁻ -N 负荷	S ₁	S ₂	S ₃	S _C	v
32.08	8.55	37.43	8.74	54.72	0.61
27.85	8.55	34.32	10.18	53.05	0.59
20.59	8.55	30.18	7.86	46.59	0.52
11.52	8.55	18.24	7.19	33.98	0.38
0	8.55	0	9.23	17.78	0.20

1) v 的单位为 mg·(g·d)⁻¹; 其余为 mg·L⁻¹

当进水 NO₃⁻-N 负荷为 0 mg·L⁻¹ 时,人工湿地模型中不发生反硝化作用,树皮释碳速率为 0.20 mg·(g·d)⁻¹. 孙雅丽等^[31]在以腐朽木为碳源去除废水中的硝酸盐氮时,研究了腐朽木 COD 静态释放规律,发现未处理腐朽木与接种腐殖质的腐朽木的稳定释碳速率分别是 2.46 mg·(g·d)⁻¹ 和 3.20 mg·(g·d)⁻¹. 李同燕等^[13]在应用玉米秆作为碳源去除地下水硝酸盐的研究中,进行了玉米秆的释放试验分析,结果表明释碳稳定后,玉米秆释碳速率为 0.7 ~ 0.9 mg·(g·d)⁻¹. 可见腐朽木释碳速率远高于玉米秆和树皮,这是因为腐朽木是中空松散的结构,比表面积大,且纤维组织结构已被降解微生物破坏,其中的 COD 易溶出. 而玉米秆和树皮结构密

实,尤其是树皮,组织结构紧致,比表面积小,因此溶出 COD 较缓慢. 在释碳后期,树皮内部纤维素被分解以后,树皮结构变得松散,释碳速率可能会有所提高. 腐朽木、玉米秆、树皮的释碳周期也因各自结构特点有所不同. 孙雅丽等^[31]使用腐朽木 200 g (干重)进行碳源水解-反硝化脱氮试验,试验结果表明腐朽木前 3 周内释碳速率较快,之后释放缓慢,46 d 后释碳能力下降,不能满足反硝化需求,需更换腐朽木. 李同燕等^[13]使用 250 g (干重)玉米秆进行地下水原位净化模拟试验,发现玉米秆至少在 60 d 内有效地为原位生物反硝化提供有机质. 而笔者在其它试验中发现,使用干重 212.2 g 的树皮为碳源去除硝酸盐氮时,树皮释放的碳源可维持至少 100 d 的反硝化稳定脱氮. 可见树皮释碳速率最慢,缓释性能最佳,释碳周期最长;腐朽木释碳速率最快,缓释性能最差,释碳周期最短,需频繁更换原材料.

由式(8)可知,对于本试验而言, Q 和 m 是常数,因此树皮平均释碳速率与释碳量变化趋势相同,随着 NO_3^- -N 负荷的增加而增大,与进水 NO_3^- -N 负荷也呈线性关系. 该现象可利用化学平衡原理加以解释. 树皮释碳与反硝化是连续反应,可用如下关系式描述.

反应①树皮释碳:



反应②反硝化:



碳源在反应①中是生成物,而在反应②中是反应物. 当其他条件保持不变时,进水中 NO_3^- -N 浓度越高,即反应②中一个反应物浓度越高,则反应②向正向进行越彻底,反硝化速率越快. 因反硝化速率加快,反应②中消耗碳源增多,反应①中树皮表面剩余碳源量减少,即反应①中生成物减少,反应①向正反应方向进行,故树皮分解菌分解树皮的速率加快,分解出的碳源量也会同步递增.

本试验分析得到的树皮释碳速率,是在驯化完成后立即进行以进水 NO_3^- -N 负荷为变量的试验分析所得. 考虑到树皮与麦秆、棉花等中空松散的植物碳源不同,其材质较密实;且本试验中树皮被加工成 $1 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 规格的块状结构,尺寸较大. 因此,树皮释放碳源的周期远长于中空松散的植物碳源,本试验前期所得的树皮释碳规律会在很长一段时间内保持不变. 本试验由于受时间的限制,未能对树皮填料全寿命周期内释碳变化规律展开试验分析,树皮填料后期释碳规律有待后续深入研究.

2.4 树皮释碳完成后处置

树皮是天然的纤维素物质,释碳完成后,残留物质以木质素为主,可生化性较差,废弃后可作为垃圾直接填埋或作为燃料焚烧,不易产生二次污染.

3 结论

(1)树皮填料人工湿地具有脱氮可行性,不投加碳源的情况下,当进水 NO_3^- -N 为 $27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, NO_3^- -N 去除率可以稳定在 43% 左右.

(2)进水 NO_3^- -N 负荷对人工湿地的反硝化过程有影响. 反硝化速率随进水 NO_3^- -N 负荷增大而递增且遵循 Monod 关系式,饱和常数 $K_s = 19.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;进水 NO_3^- -N 负荷越低硝氮去除率越高.

(3)进水 NO_3^- -N 负荷对树皮填料的释碳过程有影响. 树皮释碳量和释碳速率随进水 NO_3^- -N 负荷增大而递增,与进水 NO_3^- -N 负荷均呈线性关系.

(4)当进水 NO_3^- -N 负荷为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,树皮释碳速率为 $0.2 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$,低于腐朽木等中空松散的植物碳源的释碳速率. 树皮的碳源缓释性能较好,其释碳周期较长,是一种良好的缓释碳源.

参考文献:

- [1] 苑泉,王海燕,刘凯,等. HRT 对城市污水厂尾水反硝化深度脱氮的影响[J]. 环境科学研究, 2015, 28(6): 987-993. Yuan Q, Wang H Y, Liu K, et al. Effects of HRT on denitrification for advanced nitrogen removal of wastewater treatment plant effluent [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(6): 987-993.
- [2] 吴兴海,杨露. 城镇污水厂常用污水深度脱氮技术比较分析[J]. 绿色科技, 2016, (10): 15-17. Wu X H, Yang L. Comparison and analysis on the technology of deep denitrification in municipal wastewater treatment plant [J]. Journal of Green Science and Technology, 2016, (10): 15-17.
- [3] 姜应和,李超. 树皮填料补充碳源人工湿地脱氮初步试验研究[J]. 环境科学, 2011, 32(1): 158-164. Jiang Y H, Li C. Preliminary study on denitrification capacity of constructed wetlands filled by bark [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2011, 32(1): 158-164.
- [4] Hareendran R. A study of denitrification kinetics at low temperatures using methanol as the external carbon source [D]. Washington: The George Washington University, 2010.
- [5] Gómez M A, González-López J, Hontoria-García E. Influence of carbon source on nitrate removal of contaminated groundwater in a denitrifying submerged filter [J]. Journal of Hazardous Materials, 2000, 80(1-3): 69-80.
- [6] Rustige H, Nolde E. Nitrogen elimination from landfill leachates using an extra carbon source in subsurface flow constructed wetlands [J]. Water Science and Technology, 2007, 56(3): 125-133.
- [7] Lu S L, Hu H Y, Sun Y X, et al. Effect of carbon source on the denitrification in constructed wetlands [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(8): 1036-1043.

- [8] Lin Y F, Jing S R, Wang T W, *et al.* Effects of macrophytes and external carbon sources on nitrate removal from groundwater in constructed wetlands [J]. *Environmental Pollution*, 2002, **119** (3): 413-420.
- [9] 李晓威, 贾亚红, 李冰, 等. 人工湿地植物缓释碳源的预处理方式及释碳性能研究[J]. *水处理技术*, 2013, **39** (12): 46-48, 52.
Li X W, Jia Y H, Li B, *et al.* Research on pretreatment methods and carbon releasing property of constructed wetland plant as slow-releasing carbon source [J]. *Technology of Water Treatment*, 2013, **39**(12): 46-48, 52.
- [10] 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]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2009, **30** (5): 1414-1419.
- [11] 范振兴, 赵璇, 王建龙. 利用辐照预处理麦秆作为反硝化固体碳源的研究[J]. *环境科学*, 2009, **30** (4): 1090-1094.
Fan Z X, Zhao X, Wang J L. Denitrification using radiation-pretreated wheat straw as solid carbon source [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2009, **30** (4): 1090-1094.
- [12] 马兴冠, 赵秋菊, 江涛. 人工湿地植物外加碳源的预处理研究[J]. *水处理技术*, 2015, **41** (7): 26-30, 44.
Ma X G, Zhao Q J, Jiang T. The Pretreatment of external carbon source for the artificial wetland plants[J]. *Technology of Water Treatment*, 2015, **41** (7): 26-30, 44.
- [13] 李同燕, 李文奇, 胡伟武, 等. 玉米秆碳源去除地下水硝酸盐[J]. *环境工程学报*, 2015, **9** (9): 4245-4251.
Li T Y, Li W Q, Hu W W, *et al.* Performances of bio-denitrification using maize stalks as carbon source for nitrate-contaminated groundwater in-situ remediation [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9** (9): 4245-4251.
- [14] 肖蕾, 贺锋, 梁雪, 等. 不同碳源添加量对垂直流人工湿地污水处理效果的影响[J]. *环境工程学报*, 2013, **7** (6): 2074-2080.
Xiao L, He F, Liang X, *et al.* Impact of solid carbon sources supplement amount on performance of wastewater treatment effect in vertical-flow constructed wetland [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, **7** (6): 2074-2080.
- [15] Greenan C M, Mooman T B, Parkin T B, *et al.* Denitrification in wood chip bioreactors at different water flows [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, **38** (4): 1664-1671.
- [16] 刘刚, 闻岳, 周琪. 补充生物质强化水平潜流湿地去除硝酸盐氮研究[J]. *中国给水排水*, 2009, **25** (21): 13-16.
Liu G, Wen Y, Zhou Q. Adding biomass for removal of nitrate in horizontal subsurface flow constructed wetland[J]. *China Water & Wastewater*, 2009, **25** (21): 13-16.
- [17] Ullah S, Faulkner S P. Use of cotton gin trash to enhance denitrification in restored forested wetlands [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, **237** (1-3): 557-563.
- [18] 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.
- [19] 傅海霞, 麻倩, 李建民, 等. 以纸为固体碳源去除水中硝酸盐的研究[J]. *江西农业学报*, 2014, **26** (7): 92-95.
Fu H X, Ma Q, Li J M, *et al.* Study on removal of nitrate from water by using newspaper as solid carbon source [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2014, **26** (7): 92-95.
- [20] Volokita M, Belkin S, Abeliovich A, *et al.* Biological denitrification of drinking water using newspaper [J]. *Water Research*, 1996, **30** (4): 965-971.
- [21] 王曼曼, 汪家权, 褚华男. 固态碳源去除地下水硝酸盐的模拟实验[J]. *环境工程学报*, 2013, **7** (2): 501-506.
Wang M M, Wang J Q, Chu H N. Simulation test of nitrate removal in groundwater with solid carbon source [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, **7** (2): 501-506.
- [22] 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.
- [23] 唐婧, 刘昱迪, 孙凤海, 等. 以玉米芯为外加碳源的SBBR脱氮特性[J]. *环境工程学报*, 2016, **10** (6): 2775-2780.
Tang J, Liu Y D, Sun F H, *et al.* Characteristics of nitrogen removal in SBBR using corncob as carbon source [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10** (6): 2775-2780.
- [24] 邵留, 徐祖信, 王晟, 等. 新型反硝化固体碳源释碳性能研究[J]. *环境科学*, 2011, **32** (8): 2323-2327.
Shao L, Xu Z X, Wang S, *et al.* Performance of new solid carbon source materials for denitrification [J]. *Environmental Science*, 2011, **32** (8): 2323-2327.
- [25] 郑丽银, 缪恒锋, 严群, 等. 用于地表水反硝化的纤维素碳源选择研究[J]. *环境工程学报*, 2011, **5** (9): 1926-1932.
Zheng L Y, Liao H F, Yan Q, *et al.* Selection of cellulose carbon sources for biological denitrification of surface water [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, **5** (9): 1926-1932.
- [26] 谢林花, 丁绍兰, 陈晓娇, 等. 壳类农业废弃物固体碳源释碳性能研究[J]. *陕西科技大学学报*, 2013, **31** (5): 39-44.
Xie L H, Ding S L, Chen X J, *et al.* Study on releasing carbon performance of agricultural waste shells as solid carbon sources [J]. *Journal of Shaanxi University of Science and Technology*, 2013, **31** (5): 39-44.
- [27] 冯延申, 黄天寅, 刘锋, 等. 反硝化脱氮新型外加碳源研究进展[J]. *现代化工*, 2013, **33** (10): 52-57.
Feng Y S, Huang T Y, Liu F, *et al.* New types of extra carbon sources for denitrification [J]. *Modern Chemical Industry*, 2013, **33** (10): 52-57.
- [28] 张自杰, 林荣忱, 金儒霖. 排水工程下册[M]. (第四版). 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [29] Li P, Zuo J N, Xing W, *et al.* Starch/polyvinyl alcohol blended materials used as solid carbon source for tertiary denitrification of secondary effluent [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25** (10): 1972-1979.
- [30] 金雪标, 阎宁. 三种反硝化工艺比较[J]. *给水排水*, 2003, **29** (1): 32-34.
Jin X B, Yan N. Comparison of denitrification processes [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2003, **29** (1): 32-34.
- [31] 孙雅丽, 张国臣, 阎中, 等. 以腐朽木为碳源去除废水中硝酸盐氮的研究[J]. *环境科学*, 2010, **31** (6): 1494-1498.
Sun Y L, Zhang G C, Yan Z, *et al.* Removing nitrate-nitrogen from wastewater using rotten wood as carbon source [J]. *Environmental Science*, 2010, **31** (6): 1494-1498.

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 Dajiuhe, 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-qiu, 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 Nitritation 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 Strengthened 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 Suya 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 Cetrizine 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)