

包埋硝化/碳源缓释脱氮耦合反应器对雌激素的去除

胡碧波, 郭威, 阳春, 刘国臣

(重庆大学城市建设与环境工程学院 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 构建了基于包埋硝化颗粒和以废弃玉米芯为缓释碳源的包埋硝化/碳源缓释耦合脱氮反应器,以强化硝化反硝化生物脱氮性能,并充分利用硝化细菌的共代谢作用去除雌激素。在反硝化单元中,碳源柱的反硝化速率常数为 0.129 8,是沸石对照柱(0.058 6)的 2.22 倍。在 10~15℃ 时耦合反应器对 TN 的去除率 $\geq 70.28\%$,出水 TN 浓度 ≤ 10.4 mg/L,出水 COD ≤ 31.22 mg/L。通过硝化细菌的共代谢作用以及包埋颗粒和滤料的物理吸附作用,耦合反应器对雌酮(E1)、17 β -雌二醇(E2)、17 α -乙炔基雌二醇(EE2)的去除率可分别稳定在 60%、90% 和 80% 以上。

关键词: 玉米芯缓释碳源; 反硝化滤池; 雌激素; 包埋硝化颗粒

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)11-0026-07

Estrogens Removal by Coupling Reactor with Immobilized Nitrification/Denitrification Using Corncob as Slow-release Carbon Source

HU Bi-bo, GUO Wei, YANG Chun, LIU Guo-chen

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to enhance nitrification-denitrification biological nitrogen removal as well as remove steroid estrogens via co-metabolism of nitrifying bacteria, a novel nitrogen removal reactor was developed using immobilized nitrobacteria pellets coupled with denitrification filter using discarded corncob as slow-release carbon source. The denitrification rate constant of carbon source column ($K_m = 0.1298$) was 2.22 times of zeolite column ($K_m = 0.0586$). The removal rate of TN in coupling reactor was above 70.28%, and its concentration in the effluent was below 10.4 mg/L at 10–15℃. Meanwhile, the concentration of COD in effluent was below 31.22 mg/L. The removal rates of E1, E2 and EE2 were above 60%, 90% and 80% respectively, resulting from the co-metabolism by nitrifying bacteria or the adsorption of immobilized particle and filter.

Key words: corncob slow-release carbon source; denitrification filter; estrogen; immobilized nitrobacteria pellet

类固醇雌激素主要是哺乳动物内分泌系统分泌的内源性物质,包括人类和其他动物分泌的雌酮(E1)、17 β -雌二醇(E2)、雌三醇(E3),还有避孕药和内分泌相关药物中含有的 17 α -乙炔基雌二醇

(EE2)。其雌情活力可造成鱼类或两栖动物雌雄一体化,并与人类女性性早熟和生殖系统癌变、男性生殖力下降等疾病有关^[1]。雌激素 E1、E2 和 EE2 是造成水环境中雌情活力升高的主要物质,虽然污水

厂的生化处理单元对雌激素具有一定的去除效果,但研究表明其在污水厂出水中仍广泛存在^[1]。除此之外,由于城市发展的滞后,合流制管网依旧大量存在,尤其是老城区,在旱季累积的污染物随着暴雨期的溢流污水直接排放到自然环境中,而溢流水中的雌激素浓度较高^[2-3],对生态环境具有雌情活力影响的风险。

雌激素深度处理的技术发展多元,颗粒活性炭和粉末活性炭对 E1、E2、E3、EE2 的吸附去除率均能达到 90% 以上,但是成本较高且再生过程困难^[4]。FeCl₃/NaNO₂ 高级氧化法在 24 h 内对 E2 的去除率为 86.6%,反应时间偏长^[5]。有研究显示传统活性污泥法(异养细菌)、A/O 活性污泥法(自养细菌)、A/A/O 活性污泥法(异养/自养细菌)对总体雌激素的去除率分别为 51%、91% 和 80%,说明自养型硝化细菌的存在更有利于雌激素的去除^[6]。包埋硝化细菌颗粒是一种微生物种群纯度高、微生物数量多的生物强化技术。其以聚氨酯水凝胶为载体,且细小孔隙结构丰富,内部包裹有硝化细菌和颗粒活性炭。微生物被固定附着在载体上,小分子底物及代谢产物可以自由出入。相比传统硝化反应,包埋硝化细菌颗粒对氨氮的去除效果更好,同时利用硝化细菌的共代谢作用能较好地去除雌激素^[7]。

氨氮硝化反应后的产物硝态氮仍存在于所处理的污水中,可能导致出水 TN 不合格。多项研究表明采用玉米芯为反硝化碳源,具有成本低、操作方便等优点,且脱氮效果能够满足城市污水处理的要求^[8-12]。玉米芯作为农业废弃物比较容易获得,其循环利用不仅可以用于水污染的治理,也缓解了固废垃圾处理的压力。笔者以玉米芯为反硝化碳源,耦合包埋硝化细菌颗粒构建脱氮系统,探讨其深度去除污水中雌激素的效果。这可为污水厂的提标改造和合流制溢流污水治理提供理论依据,具有工程实际意义。

1 材料和方法

1.1 试验装置和运行

脱氮耦合反应器由硝化单元、反硝化单元和过滤单元组成(如图 1 所示),处理规模为 72 L/d。硝化单元的反应柱内径为 120 mm,有效高度为 1 100 mm,有效容积为 12.5 L,水力停留时间为 4 h。填充的包埋硝化细菌颗粒购自上海交通大学,由聚氨酯水凝胶、颗粒活性炭和硝化细菌组成,颗粒尺寸为 3

mm × 3 mm × 3 mm,呈黑色,填充率为 10%,采用鼓风曝气控制水中 DO 在 4 ~ 5 mg/L 之间。反硝化单元由碳源柱和沸石柱组成,每个反应柱内径为 100 mm,有效高度为 800 mm,有效容积为 6.3 L,水力停留时间为 4 h。其中,碳源柱按比例 2 : 1 混合填充玉米芯和 2 ~ 4 mm 沸石,为方便玉米芯的更换,混合填料分别包裹在 9 个直径为 100 mm 的 PP(聚丙烯)悬浮球填料中;沸石柱中填料全为沸石,沸石柱每 30 d 反冲洗 1 次,冲洗强度为 4 L/(s · m²),冲洗时间为 2 min。过滤单元为石英砂柱,内径为 100 mm,有效高度为 800 mm,有效容积为 6.3 L,水力停留时间为 2 h,内填充 1 ~ 2 mm 石英砂滤料,石英砂柱每 7 d 反冲洗 1 次,冲洗强度为 14 L/(s · m²),冲洗时间为 6 min。整个反应器通过蠕动泵控制进水,24 h 连续运行。

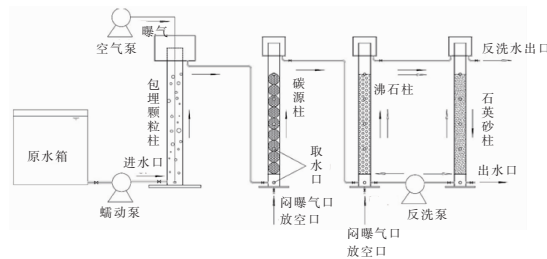


图 1 脱氮耦合反应器装置

Fig. 1 Reactor of immobilized nitrobacteria coupling with denitrification filter

1.2 原水水质

原水采用人工配制废水,主要成分为氯化铵、磷酸二氢钾、碳酸氢钠,同时投加氯化钾、硫酸镁、氯化钴、硫酸锰等微量元素,其中氯化铵用作硝化细菌的主要氮源,控制氨氮浓度在 30 mg/L 左右。待硝化单元和反硝化单元中的微生物驯化成功后,在原水中添加 E1、E2 和 EE2,浓度分别控制在 40、15、5 ng/L 左右。

1.3 水样分析方法

常规水质指标采用《水和废水监测分析方法》(第 4 版)进行测定;雌激素采用固相萃取的预处理方式和液相色谱双级质谱(HPLC-MS/MS)内标分析方法检测^[13];三维荧光光谱采用日立公司 F-7000 荧光分光光度计进行分析,分析前将水样稀释 25 倍;电镜扫描(SEM)采用 Tescan 公司 Mira3 LMH 场发射扫描电镜进行观察,生物样预处理采用戊二醛固定和乙醇梯度浓度脱水的方法^[14]。

1.4 耦合反应器低温启动方法

在温度为 10 ~ 15 °C 的条件下,硝化单元的启动分为驯化和稳定运行两个阶段,整个过程的进水氨氮浓度为 30 mg/L 左右。驯化阶段进入到第 12 天出水氨氮浓度稳定在 6.1 ~ 7.8 mg/L,去除率为 73.5% ~ 80.5%,说明驯化成功并进入稳定运行阶段^[15]。反硝化单元采用接种挂膜法启动,分为间歇曝气阶段和降负荷连续培养阶段,进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 30 mg/L 左右,运行至第 9 天去除率稳定在 60% 以上,说明培养成功并进入稳定运行阶段^[16]。

1.5 固态碳源的预处理

玉米芯收集于重庆市沙坪坝菜市场,将玉米芯切成高为 1 cm 的半圆柱体,放置烘箱中在 30 °C 条件下干燥 48 h 后保存于干燥器内。

1.6 反硝化动力学模型

根据物料平衡关系以及当反应器中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度高于 0.1 mg/L 时,反硝化速率与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度呈零级反应关系,与反硝化菌浓度呈一级关系,基于 Monod 方程推导出的推流式反硝化动力学模型如下^[17]:

$$C_t = C_0 \cdot \exp(-K_m \cdot N) \quad (1)$$

式中: C_t 是 HRT 为 N 时水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度, mg/L; C_0 为进水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度, mg/L; K_m 为待求的反硝化动力学常数; N 为取水点对应的 HRT, h。

2 结果和讨论

2.1 耦合反应器脱氮性能分析

在 10 ~ 15 °C 条件下,耦合反应器稳定运行时,其进水和各反应柱出水的 COD、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度及其变化范围如图 2 所示。

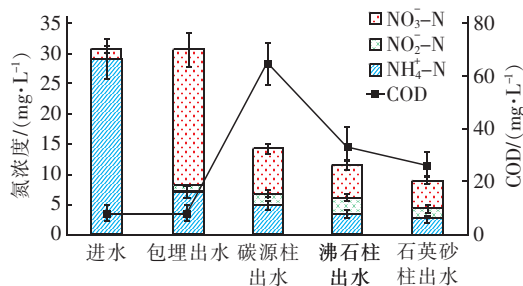


图2 耦合反应装置沿程 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、COD 浓度变化

Fig.2 Variation of $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and COD concentration along the process

由图 2 可知,包埋硝化细菌颗粒柱对氨氮的去

除效果最佳,进水浓度在 30 mg/L 左右时,出水浓度均低于 8.2 mg/L,去除率在 74.45% 以上,但低于 22 °C 时 97% 的去除率^[18],原因是温度降低会抑制包埋颗粒中硝化细菌的活性,使其降解速率下降。在后续反应柱中氨氮被少量降解,可能是后续反应柱中有少量厌氧氨氧化细菌存在,在缺氧条件下能够利用亚硝态氮作为电子受体,将氨氮还原为氮气^[19];又或者滤柱中存在滤料和生物膜的吸附拦截,最终通过反冲洗得到去除。

大部分氨氮转为硝态氮后存在于硝化单元出水中,并流入反硝化单元。碳源柱中的玉米芯向水中缓慢释放可生物降解的高质量碳源,如类色氨酸类、酪氨酸类和芳香蛋白质类。碳源柱中基质溶液的三维荧光光谱如图 3(a) 所示,其荧光峰峰值出现在两个位置,激发波长 (E_x)/发射波长 (E_m) 为 200 ~ 230/280 ~ 350 nm,代表酪氨酸类和芳香蛋白质类物质; E_x/E_m 为 250 ~ 280/280 ~ 350 nm,代表类色氨酸类物质^[20]。这些物质为硝态氮的去除提供了营养基础。碳源柱出水的三维荧光光谱如图 3(b) 所示,相对碳源柱中基质,其荧光峰强度明显减弱,且向类富里酸和类胡敏酸区域偏移,说明玉米芯释放出来的大量可生物降解的物质在碳源柱中被微生物利用,剩下少部分易生物降解的物质和难微生物利用的物质随出水进入沸石柱中。

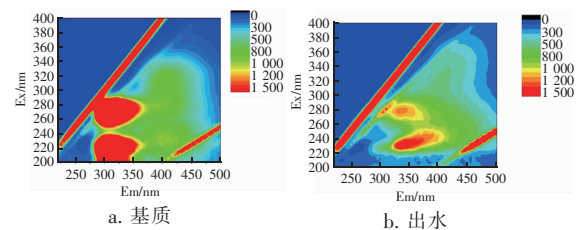


图3 碳源柱基质和出水的三维荧光光谱

Fig.3 3D fluorescence contour spectra of substrate and effluent in carbon source column

在碳源柱中硝态氮的去除率在 64.02% 以上,出水硝态氮浓度低于 8.72 mg/L。虽然碳源柱出水中的 COD 最高达到了 73.97 mg/L,可沸石柱对硝态氮的去除率最高仅为 30.7%,原因之一是碳源柱出水中存在还原性的非有机物而导致 COD 测量值偏高,如玉米芯中含有的镁、铁、锰、硫等矿物质元素^[21];另一个原因是出水中含有难生物降解的类胡敏酸和类富里酸类等物质,抑制了沸石柱中反硝化细菌的生物活性,因为在沸石反硝化柱的出水中出

现了亚硝酸盐的累积,此情况与以难生物降解的葡萄糖为碳源时的情况相似^[22],由于可供生物利用的碳源不足,导致亚硝态氮无法最终还原为氮气。沸石柱出水 COD 为 34.23 mg/L,说明沸石柱中的反硝化细菌利用了一部分有机物作为碳源进行反硝化作用。石英砂柱出水中 COD 为 26.78 mg/L,可能有异养细菌随污水流出沸石柱被石英砂柱截留,在石英砂柱中降解了部分有机物;也有可能是有机物被石英砂或细小悬浮固体吸附,从而被截留下来最终通过反冲洗去除。该耦合反应器对 TN 的去除率可达 70.28% 以上,且出水 TN 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、COD 浓度均满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准。

对干燥预处理后的玉米芯和耦合反应器稳定运行后的玉米芯进行 SEM 观察,结果如图 4 所示。仅干燥预处理的玉米芯表面凹凸不平,孔隙和纤维结构较多,有益于微生物的附着,没有微生物的存在迹象;耦合反应器稳定运行时,玉米芯表层已经布满杆状和球状的微生物(见红色方框)。去除生物膜后的玉米芯表面孔隙变得比较规整,说明玉米芯不仅能够作为挂膜的良好载体,其作为优质碳源也可被多种微生物降解利用。

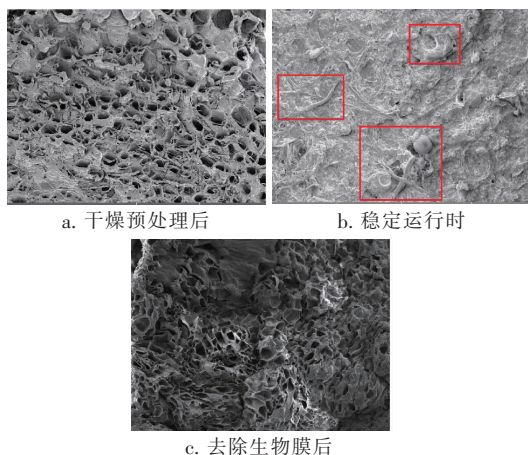


图4 稳定运行前后玉米芯表面电镜扫描照片

Fig.4 SEM photo of corncob before and after microbe utilization

当装置稳定运行后,对碳源柱和沸石柱上间隔 20 cm 的取样口分别取样,测得 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度见表 1。利用反硝化动力学模型进行拟合,对于碳源柱,拟合方程为 $y = 0.1298x + 0.1205$, $R^2 = 0.9149$,即反硝化动力学常数值为 0.1298;对于沸石柱,拟合方程为 $y = 0.0586x + 0.0104$, $R^2 = 0.8659$,即反硝

化动力学常数值为 0.0586。这证实了在可利用碳源基质不充足的条件下,反硝化的速率将受到严重抑制。当碳源为乙酸钠时^[14],在稳定运行条件下反硝化动力学常数值为 0.2495,原因是乙酸钠分子较小,更容易被微生物利用,而玉米芯需要缓慢溶解或经微生物分解后才能被反硝化细菌利用。

表1 反硝化动力学拟合

Tab.1 Fitting of denitrification kinetics $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	C_0	C_t			
		0.5 h	1 h	1.5 h	2 h
碳源柱	22.65	18.78	14.45	10.86	7.31
沸石柱	7.29	7.03	6.61	5.89	5.23

2.2 耦合反应器去除雌激素效能分析

分别将硝化单元和反硝化单元中的微生物驯化成功后,整个耦合反应器连续运行 25 d,进水 E1、E2、EE2 的浓度均值分别为 40.14、13.58、4.11 ng/L。运行初期,对雌激素的良好去除效果来源于包埋颗粒中的活性炭和滤料的物理吸附拦截作用。但随着吸附能力的逐渐衰竭,微生物对雌激素逐渐适应并成熟,雌激素的主要去除机理逐渐转变为微生物降解。由于微生物、包埋颗粒和滤料对不同雌激素的代谢作用和吸附效果有差异,因此去除效果及达到稳定运行的时间不同。其中 E1 在第 10 天后处理效果达到稳定,去除率为 60%~70%;E2 在第 8 天后处理效果趋于稳定,去除率在 90% 左右;EE2 在第 12 天后处理效果达到稳定,去除率在 80% 左右(见图 5)。3 种雌激素对生态环境中雌情活力的影响效果可以用雌二醇当量值(EEQ)来表示:总雌激素浓度 = $[E1] \times 0.34 + [E2] + [EE2] \times 10$ 。因此,整个耦合反应器对雌激素的去除效果可以用 EEQ 评价。该反应器对雌激素整体的去除效果在第 12 天后达到稳定,去除率在 80% 左右。

图 5 表明,在反应器运行初期出水 E1 浓度就逐渐升高,这是由于 E1 为 E2 微生物代谢的中间产物,且 E1 在水中的含量属于痕量级别,并不能作为微生物生长繁殖的主要能源,E1 的去除主要是依靠微生物的共代谢作用来完成,包埋硝化菌通过将氨氮氧化成硝态氮获得能量的同时,E1 在硝化菌内生成的生物氧化酶的作用下被氧化^[23],E1 的降解速率也低于 E2^[7]。E2 最容易被生物降解,但要完全矿化还需要更多微生物的作用。EE2 难于被微生物利用分解,部分去除靠包埋颗粒中活性炭和滤料的

物理吸附作用^[7],且污水中的悬浮颗粒对 EE2 的吸附作用能增强滤池对雌激素的去除能力^[24]。

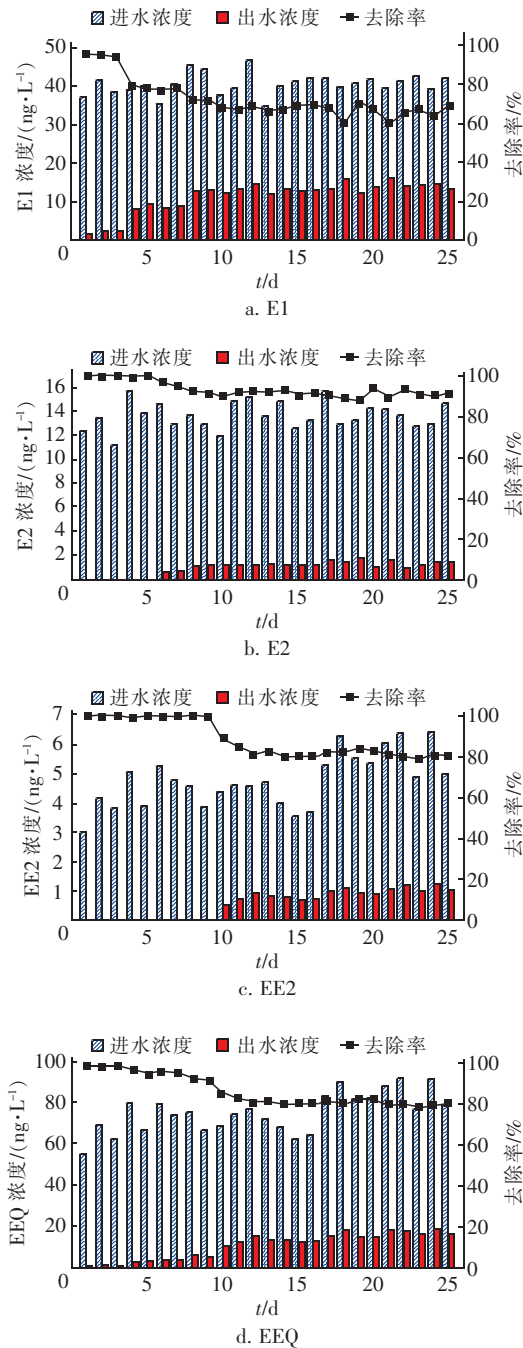


图5 耦合反应器对雌激素的去除效果

Fig.5 Removal effect of estrogens in coupling reactor

3 结论

① 包埋硝化细菌颗粒能将氨氮的去除率稳定维持在 74.45% 以上,是氨氮的主要去除单元,但对 TN 的去除贡献极小。

② 玉米芯作为固态缓释碳源能够提供优质的

蛋白质、氨基酸等可生化降解的有机物供反硝化细菌生长繁殖,且成本较低,出水中 TN 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、COD 浓度均达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准。

③ 启动运行 12 d 后,耦合反应器对 E1、E2、EE2 的去除率分别稳定在 60%、90%、80% 以上,可降低生态环境的雌情活力影响风险,具有操作简便、成本相对较低等工程价值。

参考文献:

- [1] Shi J, Fujisawa S, Nakai S, et al. Biodegradation of natural and synthetic estrogens by nitrifying activated sludge and ammonia-oxidizing bacterium *Nitrosomonas europaea* [J]. Water Res, 2004, 38(9): 2323–2330.
- [2] Phillips P J, Chalmers A T, Gray J L, et al. Combined sewer overflows: an environmental source of hormones and wastewater micropollutants [J]. Environ Sci Technol, 2012, 46(10): 5336–5343.
- [3] 王亚丹. 污水处理和受纳水体中硫酸雌酮水平及芳基硫酸酯酶活性的基础研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
Wang Yadan. Preliminary Study on the Estrone-3-Sulphate Presense and Arylsulphatase Activity in Sewage Treatment and the Receiving Waterbody [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013 (in Chinese).
- [4] Snyder S A, Adham S, Redding A M, et al. Role of membranes and activated carbon in the removal of endocrine disruptors and pharmaceuticals [J]. Desalination, 2007, 202(1): 156–181.
- [5] Wang L Z, Zhang F F, Liu R H, et al. $\text{FeCl}_3/\text{NaNO}_2$: an efficient photocatalyst for the degradation of aquatic steroid estrogens under natural light irradiation [J]. Environ Sci Technol, 2007, 41(10): 3747–3751.
- [6] McAdam E J, Bagnall J P, Koh Y K K, et al. Removal of steroid estrogens in carbonaceous and nitrifying activated sludge processes [J]. Chemosphere, 2010, 81(1): 1–6.
- [7] 胡碧波, 阳春, 张伟, 等. 包埋颗粒对污水中雌激素的吸附和生物降解研究 [J]. 中国给水排水, 2016, 32(11): 72–75.
Hu Bibo, Yang Chun, Zhang Wei, et al. Adsorption and biodegradation of estrogens in wastewater by embedded pellets [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(11): 72–75 (in Chinese).

- [8] 陈佼,张建强,黄雯,等. 玉米芯缓释碳源对 CRI 系统脱氮效能的影响[J]. 环境科学与技术,2018,41(4): 103-109.
Chen Jiao, Zhang Jianqiang, Huang Wen, *et al.* Experimental study on efficacy of corncob as sustained-release carbon source for improving nitrogen removal in CRI system[J]. Environmental Science & Technology, 2018,41(4):103-109(in Chinese).
- [9] 邵留,徐祖信,金伟,等. 农业废物反硝化固体碳源的优选[J]. 中国环境科学,2011,31(5):748-754.
Shao Liu, Xu Zuxin, Jin Wei, *et al.* Optimization of solid carbon source for denitrification of agriculture wastes [J]. China Environmental Science, 2011,31(5):748-754(in Chinese).
- [10] 唐婧,黄盼宁,傅金祥,等. 玉米芯为外碳源对 SBBR 反硝化除磷性能的影响[J]. 环境工程学报,2016,10(9):4705-4710.
Tang Jing, Huang Panning, Fu Jinxiang, *et al.* Effect of corncob as external carbon source on nitrogen and phosphorus removal of SBBR [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016,10(9):4705-4710 (in Chinese).
- [11] 李斌,郝瑞霞,赵文莉. 玉米芯与海绵铁复合填料的反硝化脱氮特性[J]. 中国给水排水,2014,30(7): 31-34,38.
Li Bin, Hao Ruixia, Zhao Wenli. Research on corncob/sponge iron composite media for denitrification [J]. China Water & Wastewater, 2014,30(7):31-34,38 (in Chinese).
- [12] 赵文莉,郝瑞霞,王润众,等. 以碱处理玉米芯为碳源去除二级出水中硝酸盐[J]. 中国给水排水,2016,32(7):107-111.
Zhao Wenli, Hao Ruixia, Wang Runzhong, *et al.* Removal of nitrate from secondary effluent by denitrification with corncob pretreated by alkali as carbon source[J]. China Water & Wastewater, 2016,32(7):107-111(in Chinese).
- [13] 阳春,邹玲,胡碧波,等. 固相萃取/高效液相色谱/串联质谱法同时测定水中雌激素[J]. 中国给水排水,2014,30(4):87-91.
Yang Chun, Zou Ling, Hu Bibo, *et al.* Simultaneous detection of estrogens in sewage and river water by solid phase extraction/HPLC-MS/MS[J]. China Water & Wastewater, 2014,30(4):87-91(in Chinese).
- [14] 张仲航. 反硝化浅层滤池(DSB)脱氮效能与微生物群落结构研究[D]. 福州:福建工程学院,2018.
Zhang Zhonghang. Study on Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Structure of Denitrification Shallow Biofilter (DSB) [D]. Fuzhou: Fujian University of Technology, 2018(in Chinese).
- [15] 胡碧波,阳春,张伟,等. 包埋硝化菌颗粒对 17 β -雌二醇的去除特性研究[J]. 中国给水排水,2015,31(15):89-92.
Hu Bibo, Yang Chun, Zhang Wei, *et al.* Removal of 17 β -estradiol by embedded nitrobacteria pellets [J]. China Water & Wastewater, 2015,31(15):89-92 (in Chinese).
- [16] 李东. 前置与后置反硝化生物滤池深度脱氮工艺对比研究[D]. 北京:北京林业大学,2016.
Li Dong. The Comparison of Pre-denitrification and Post-denitrification in BAF Process on Nitrogen Removal [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016 (in Chinese).
- [17] 高建锋,杨碧印,赵建树,等. 反硝化生物滤池用于再生水脱氮效能及动力学研究[J]. 环境工程学报,2016,10(1):199-204.
Gao Jianfeng, Yang Biyin, Zhao Jianshu, *et al.* Nitrogen removal and denitrification kinetics of denitrification biological filter for reclaimed water treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016,10(1):199-204(in Chinese).
- [18] 葛晓虹,张振家,王毅军. 固定化包埋硝化菌去除源水中氨氮研究[J]. 中国给水排水,2006,22(3):51-54.
Ge Xiaohong, Zhang Zhenjia, Wang Yijun. Study on removing ammonia nitrogen from drinking source water by using immobilized nitrobacteria [J]. China Water & Wastewater, 2006,22(3):51-54(in Chinese).
- [19] McCarty P L. What is the best biological process for nitrogen removal: when and why? [J]. Environ Sci Technol, 2018,52(7):3835-3841.
- [20] 马挺. 水和污水处理过程中荧光性有机物的变化[D]. 杭州:浙江工业大学,2015.
Ma Ting. The Changes of Fluorescent Organic Matters in Water and Wastewater Treatment Processes [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Industry, 2015 (in Chinese).
- [21] 陈志强,李爱华,张凌青,等. 宁夏不同地区玉米芯营养成分分析[J]. 粮食与饲料工业,2010(12):51-53.
Chen Zhiqiang, Li Aihua, Zhang Lingqing, *et al.* Analysis of nutrient composition of corncob in different

regions of Ningxia[J]. Cereal & Feed Industry, 2010 (12):51-53(in Chinese).

- [22] 郑俊,孙楠. 不同性质滤料的反硝化生物滤池脱氮试验研究[J]. 水处理技术,2011,37(9):73-76.

Zheng Jun, Sun Nan. Research on nitrogen removal by denitrification biofilters with media of different characteristics [J]. Technology of Water Treatment, 2011, 37(9):73-76(in Chinese).

- [23] Yu C P, Deeb R A, Chu K H. Microbial degradation of steroidal estrogens [J]. Chemosphere, 2013, 91(9):1225-1235.

- [24] 胡碧波,阳春,刘达. 污水颗粒尺寸分布对深度过滤中雌激素去除的影响[J]. 环境工程学报,2016,10(1):47-51.

Hu Bibo, Yang Chun, Liu Da. Impact of particle size distribution on removal characteristics of steroid estrogens in sewage tertiary filtration [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(1):47-

51(in Chinese).



作者简介:胡碧波(1975-),女,辽宁鞍山人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事水污染控制理论与技术研究。

E-mail:b.hu@cqu.edu.cn

收稿日期:2018-12-20

(上接第25页)

- [5] Vandamme D, Foubert I, Muylaert K. Flocculation as a low-cost method for harvesting microalgae for bulk biomass production[J]. Trends in Biotechnology, 2013, 31(4):233-239.

- [6] 于婷. 温度、光照及氮源对拟柱孢藻生长和藻丝形态的影响[D]. 广州:暨南大学,2014.

Yu Ting. Effects of Temperature, Light and Nitrogen on the Growth and Trichome Morphology of *Cylindrospermopsis raciborskii* [D]. Guangzhou: Jinan University, 2014 (in Chinese).

- [7] 李金国,马铃,周智勇. 高锰酸钾和二氧化氯除藻试验研究[J]. 城镇供水,2016(3):38-41.

Li Jinguo, Ma Ling, Zhou Zhiyong. Experimental study on algae removal by potassium permanganate and chlorine dioxide [J]. City and Town Water Supply, 2016(3):38-41(in Chinese).



作者简介:任鹏飞(1984-),男,吉林延边人,博士,从事水处理工艺与技术研究。

E-mail:pengfeiren84@163.com

收稿日期:2018-12-09