

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.05.009

# 砾间接接触氧化/水平潜流人工湿地净化微污染河道水

蒋宇豪<sup>1,2</sup>, 李 敏<sup>1</sup>, 唐明哲<sup>3</sup>, 滕泽栋<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学 环境科学与工程学院, 北京 100083; 2. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450000; 3. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037)

**摘 要:** 以微污染河道水为处理对象,研究了砾间接接触氧化/水平潜流人工湿地复合工艺对水质的净化效果。经过 26 d 改变进水配比、曝气方式等的调控运行,成功启动复合工艺模拟装置,砾间接接触氧化区(简称砾石区)的 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率均稳定在 75% 左右, TN 去除率在 45% ~ 60%。为进一步强化净化效果,探讨了砾石区水力停留时间(HRT)和砾石曝气区与非曝气区(O/A)分段进水配比对砾石区及后置潜流人工湿地出水水质的影响。当砾石区 HRT 为 5 h 时,砾石区对污染物的去除效果较好, COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 平均去除率分别可达 72% 左右、75.28%、67.79%,人工湿地对三者的去除率分别为 31%、43%、28%;当 O/A 区分段进水配比为 1:1 时,对 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的平均去除率较高,分别为 77.39% 和 84.91%,分段进水配比为 1:2 时,对 TN 的去除率最高,达到 68.5%,人工湿地对 TN 的去除率为 24.47%。因此,砾石区 HRT 为 5 h 为较佳参数,分段进水配比可根据进水污染状况灵活选择,研究结果可为实际工程应用提供理论支撑。

**关键词:** 砾间接接触氧化; 潜流人工湿地; 微污染; 水力停留时间; 分段进水配比

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)05-0057-09

## Purification of Micro-polluted River Water by Hybrid Process of Gravel Contact Oxidation and Subsurface Flow Constructed Wetland

JIANG Yu-hao<sup>1,2</sup>, LI Min<sup>1</sup>, TANG Ming-zhe<sup>3</sup>, TENG Ze-dong<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science & Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Henan Provincial Communications Planning & Design Institute Co. Ltd., Zhengzhou 450000, China; 3. Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Purification effect of micro-polluted river water by a hybrid process of gravel contact oxidation and subsurface flow constructed wetland was investigated. After 26 days of regulation and operation by changing the influent distribution ratio and aeration mode, the hybrid process simulation device was successfully started. The removal efficiencies of COD and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  in the gravel contact oxidation zone (gravel zone for short) were both stable at about 75%, and the TN removal efficiency was 45% - 60%. In order to further enhance the purification efficiency, influences of gravel zone hydraulic retention time (HRT), influent distribution ratio between the gravel aeration zone and non-aeration zone (O/A) on effluent quality of the gravel zone and subsurface flow constructed wetland were discussed.

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07108-002)

通信作者: 李敏 E-mail: liminbjfu@126.com; 唐明哲 E-mail: pennyzhe@126.com

When HRT of gravel zone was 5 h, the gravel zone had a good removal effect on pollutants, in which the average removal efficiencies of COD,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , and TN could reach about 72%, 75.28% and 67.79%, respectively. And the removal rates of constructed wetland were 31%, 43% and 28%, respectively. When influent distribution ratio between the aeration zone and non-aeration zone was 1 : 1, the average removal efficiencies of COD and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  were higher, which were 77.39% and 84.91%, respectively. When the influent distribution ratio was 1 : 2, the maximum removal efficiency of TN was obtained, which was 68.5%, and the removal rate of TN in constructed wetland was 24.47%. Consequently, HRT of 5 h was chosen as the optimal parameter, and influent distribution ratio could be flexibly selected according to different water pollution status. The results can provide theoretical support for practical engineering applications.

**Key words:** gravel contact oxidation; subsurface flow constructed wetland; micro-pollution; HRT; influent distribution ratio

随着“水十条”政策的出台,我国各个地区的黑臭水体治理已初见成效,但是大部分河流水质仍略高于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) V类水体标准,主要为 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 超标,呈微污染状态<sup>[1]</sup>。因此,微污染河流的治理还任重道远,它不仅是对国家黑臭水体治理工作的承接,也是满足我国今后经济发展和人民美好生活愿望的重要举措。研究表明,微污染河流的修复与重度污染河流治理不同,底泥疏浚、引水冲淤<sup>[2-4]</sup>或者投加化学絮凝剂等方法均不适用,应积极寻求生态、高效,并且能够保持长期稳定性的治理技术。

砾间接触氧化工艺是一种利用砾石作为填料,在其表面形成包括好氧层、缺氧层和厌氧层微环境的较为成熟的河流水体生态净化技术,可以通过接触沉淀、吸附、生物降解等多重作用去除污染物<sup>[5]</sup>。研究表明,砾石表面生长的生物膜或藻类可以通过其代谢作用进行硝化反硝化,进而实现总氮的去除。此外,水平潜流人工湿地是一种全生态型的污水深度处理方法,主要通过填料物理截留、微生物降解、植物吸收的三重效果,达到净化污水的目的<sup>[6]</sup>。目前对于微污染河流治理的研究多以人工湿地、生态浮岛和稳定塘<sup>[7-8]</sup>等生态修复方法为主,而对于生物接触氧化的研究和实际工程较少。王曼<sup>[9]</sup>构造了O/A/O/A/O/A的加长型反应器,通过三段进水和四段进水方式来提高接触氧化工艺对污染物的去除效果,结果显示采用四段进水的去除效果最佳, TN 平均去除率为 50.31%。葛俊<sup>[10]</sup>则减少了反应池长度,通过增加回流设施来弥补分段进水情况下  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率较低的问题,在设置回流比为 30%

的情况下,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN 去除率分别为 78.1% 和 59.2%。两者的研究均存在工艺繁琐、能耗较大的问题,因此笔者采用了一种砾间接触氧化/水平潜流人工湿地的复合工艺,并将砾间接触氧化区分为曝气砾石区(以下统称砾石 O 区)和非曝气砾石区(以下统称砾石 A 区),既通过 O/A 分段进水来增加对 TN 的去除效果,又通过人工湿地弥补了分段进水导致  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率低的问题,并且具有更好的实际工程可行性。笔者探究了水力停留时间(HRT)和 O/A 分段进水配比对微污染水质净化效果的影响,确定了最佳工艺参数。此复合工艺弥补了砾间接触氧化工艺对 TN 去除效果不佳和人工湿地 HRT 过长的缺点,可为实际工程应用提供依据。

## 1 试验部分

### 1.1 试验装置

试验装置(见图1)尺寸为 3.4 m × 0.4 m × 0.3 m,材料为 PVC 塑料板。主要分为砾石 O 区(长度为 0.6 m)、砾石 A 区(长度为 1.2 m)及水平潜流人工湿地区(长度为 1.2 m,高度为 0.25 m)。采用蠕动泵进水,模拟装置底部设有曝气盘。

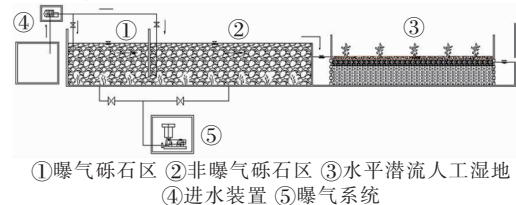


图1 砾间接触氧化/水平潜流人工湿地复合工艺模拟装置  
Fig.1 Simulation device of hybrid process of gravel contact oxidation and subsurface flow constructed wetland

砾石区所用填料为粒径 30 ~ 50 mm 的大颗粒砾石,孔隙率约为 35%。砾石 O 区和砾石 A 区底部连通,人工湿地种植植物为菖蒲<sup>[11]</sup>。

1.2 试验水质和接种污泥

试验进水为由无水乙酸钠、氯化铵、硝酸钾配制的模拟微污染河道水,COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N、TN 的浓度分别为 50、2 和 7 mg/L 左右。由于模拟微污染河道水的 COD 浓度较低,若采用自然挂膜方式,时间较长而且难度较大,因此,为了加速砾石表面挂膜,试验采用北京市某市政污水处理厂好氧池内的活性污泥进行接种挂膜。

1.3 试验方法

1.3.1 试验启动

装置的启动运行流程如表 1 所示。启动阶段调

整了水力停留时间、进水方式、曝气方式对接种污泥进行驯化培养<sup>[11]</sup>。具体过程如下:将进水 HRT 依次调整为 24、12、8 h,每个 HRT 条件下的运行时间均为 4 d,当装置运行至第 13 天时调整 HRT 为 5 h,直至挂膜成功。此外,为了使微生物适应新环境,在第 1 ~ 12 天保持单点进水,当装置运行至第 13 天时采用砾石 O/A 区 1 : 1 分段进水,以保证全段微生物的生长繁殖。在挂膜初期,1 ~ 18 d 采用全程曝气,为了使整个装置都处于好氧环境中,整个装置的溶解氧浓度维持在 6 ~ 7 mg/L,当装置运行至第 19 天时关闭砾石 A 区的曝气设施,以促进反硝化细菌的生长。每天对砾石区出水进行监测采样,并以 COD 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 的去除率趋于稳定作为填料挂膜成功的标志。

表 1 复合工艺启动流程

Tab. 1 Flow chart of start-up of the hybrid process

时间/d	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
HRT = 24 h																										
HRT = 12 h																										
HRT = 8 h																										
HRT = 5 h																										
单点进水																										
O/A 两点进水																										
全区曝气																										
曝气区曝气																										

1.3.2 参数优化

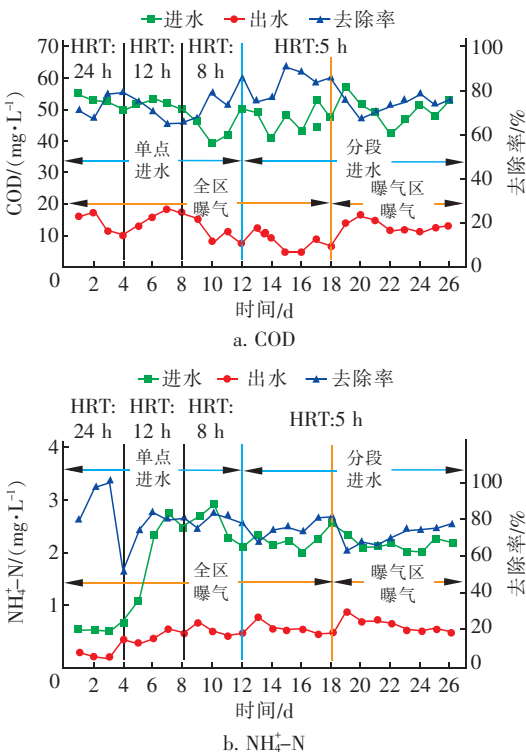
砾石接触氧化工艺的实质为设置在河道内的生物反应器,影响其对污染物去除效果的主要因素除了温度<sup>[12]</sup>、DO<sup>[13]</sup>、pH 值等河流水质天然因素外,HRT 及砾石 O/A 区分段进水配比也扮演着重要的角色,因此本试验探究了 HRT 和分段进水配比对微污染水的净化效果。

以整个砾石区为单位,分别设置 HRT 为 3、5、7 h(分段进水配比为 1 : 1),砾石 O/A 区分段进水配比为 1 : 2、1 : 1、1 : 0.5(HRT 为 5 h),每组参数的运行期为 20 d,定期对进水、砾石区出水及潜流人工湿地出水进行采样分析。

2 结果与讨论

2.1 启动期间砾石区对污染物的去除效果

试验装置用时 26 d 启动完成,在砾石表面出现了肉眼可见的黄褐色生物膜。在试验装置启动阶段,砾石区对 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 和 TN 的去除情况如图 2 所示。



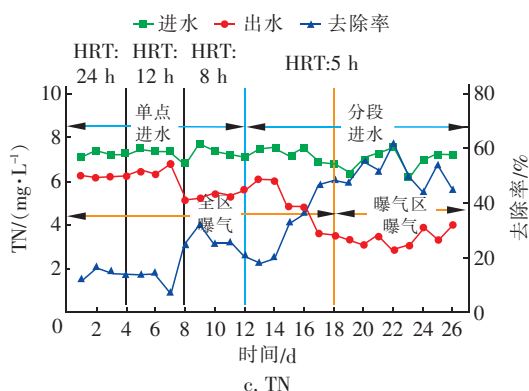


图2 启动期间砾石区对各污染物的去除效果

Fig. 2 Removal effect of pollutants in gravel zone during start-up stage

由图2可见,当HRT由24 h调整至12 h后,COD去除率有所下降,可能是由于部分微生物不适应环境而死亡<sup>[11]</sup>。运行7 d后,COD去除率逐渐上升,最终稳定在75%左右。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率开始维持在80%左右,然而当运行至第19天时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率出现下降趋势,主要是因为关闭了砾石A区的曝气装置,导致硝化作用降低<sup>[14]</sup>。随着反应的进行, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率稳定在75%左右。

TN的去除率开始一直较低,仅在15%~30%,是因为装置启动前12 d始终采用单点进水,污水中的有机物在模拟装置前半段被好氧异养微生物消耗,砾石A区异养反硝化细菌缺少碳源,且全区曝气,整个装置都处在好氧环境中,不利于TN去除<sup>[15]</sup>。当装置运行至第13天时开始砾石O/A区分段进水,增加了砾石A区的有机物浓度,为反硝化细菌提供更多碳源,因此TN去除率由20%升至35%。当装置运行至第19天时砾石A区停止曝气,处于缺氧环境,为反硝化细菌提供有利条件,TN去除率进一步提升,最终稳定在45%~60%之间。

## 2.2 HRT对复合工艺去除污染物效果的影响

### 2.2.1 砾石区

不同HRT下砾石区去除污染物的效果见图3。HRT为7 h和5 h的COD去除率基本相同(约72%),HRT过长,水力负荷较小,而在砾石O区和砾石A区部分区域的好氧异养型微生物降解吸收水中有机物的速度较快,致使后半段可溶性有机物浓度过低,部分微生物无法有效利用,不能满足其生长需要,活性下降<sup>[16]</sup>。HRT缩短为3 h,水力负荷较大,COD去除率降低到65.2%。对于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 而

言,当HRT为7 h和5 h时去除率较高,分别达到73.56%和75.28%,这是由于在砾石O区的硝化反应已经达到饱和,增加HRT对其净化效果影响不大。HRT为3 h时,由于砾石O区的HRT过短,硝化作用不充分, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率降低至70.24%。当HRT为7、5和3 h时,TN平均去除率分别是70.75%、67.79%和65.87%。由于反硝化细菌还原氮素的速率较慢<sup>[17]</sup>,反应时间越长,反硝化程度越高。此外,由于砾石O区和A区底部相连,HRT越长,从砾石O区携带溶解氧进入砾石A区的水越少,更利于反硝化作用的进行,且硝化液负荷更低,能够更充分地进行反硝化作用。综合考虑实际效果和经济效益,选择HRT为5 h。

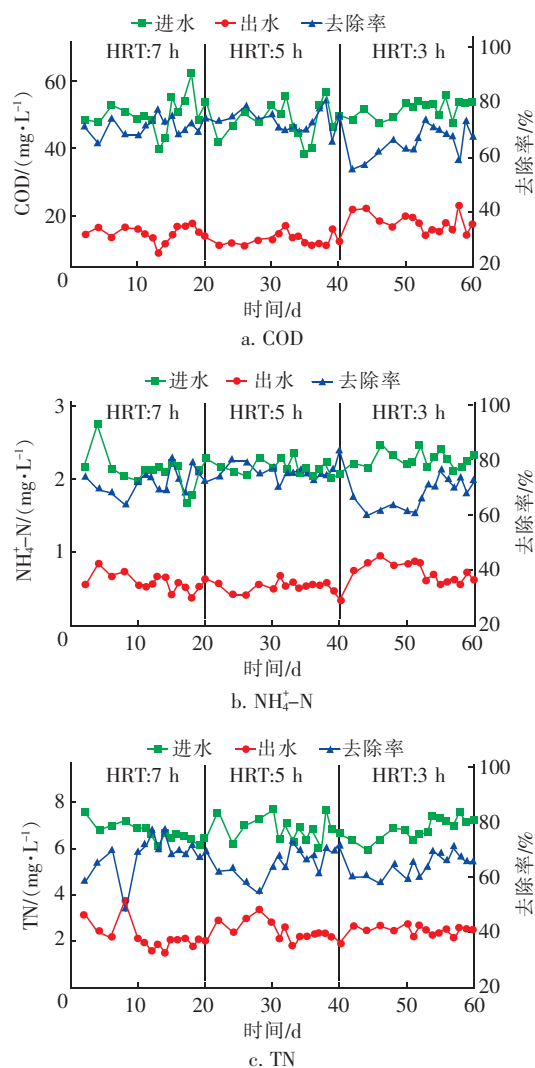


图3 不同HRT下砾石区各污染物去除效果

Fig. 3 Removal effect of pollutants in gravel zone under different HRT



## 2.2.2 潜流人工湿地段

潜流人工湿地的 HRT 随砾石区 HRT 而变化,当砾石区 HRT 为 7、5、3 h 时,潜流人工湿地的 HRT 分别为 4、3、2 h。复合工艺潜流人工湿地段对水质的净化效果如图 4 所示。

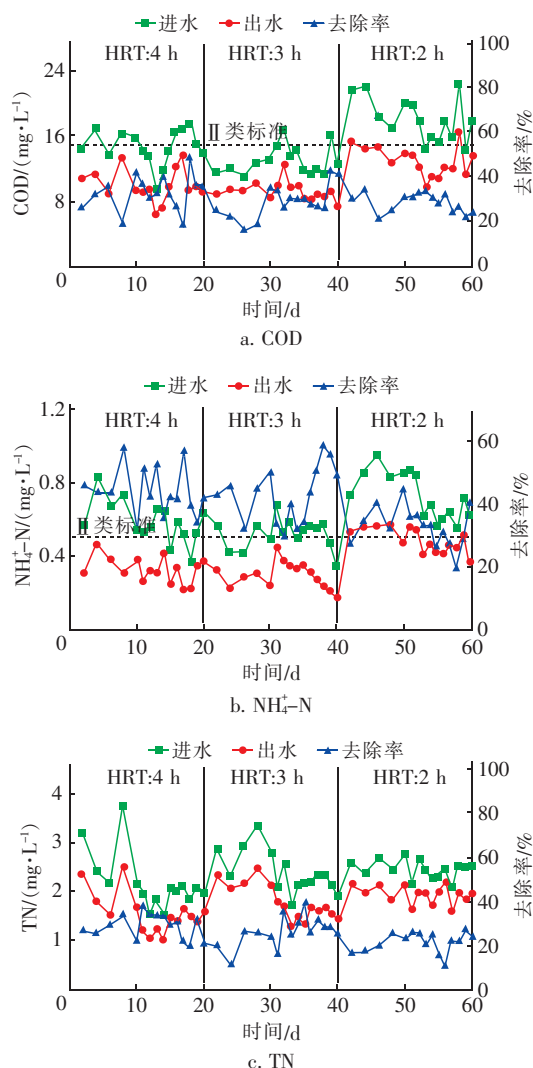


图4 不同 HRT 下潜流人工湿地段各污染物去除效果

Fig.4 Removal effect of pollutants in subsurface flow constructed wetland under different HRT

由试验结果可知,改变人工湿地的 HRT 对各污染物去除效果的影响不大,COD 去除率维持在 31% 左右,平均出水浓度为 10.69 mg/L,可达到地表 II 类水标准。湿地段对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效果较好,主要由于湿地植物根系释放氧气,增加溶解氧浓度,且人工湿地填料表面富集大量微生物<sup>[18]</sup>, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  平均去除率可达 43%,出水平均浓度为 0.371 mg/L,大部分能够达到地表 II 类水标准。潜流人工湿地对

TN 的去除率较低,为 28% 左右,出水总氮平均浓度为 1.75 mg/L,这是因为当微污染河水经过砾石区后,COD 浓度已经降到 15.21 mg/L 左右,浓度已经较低,能够被反硝化细菌利用的有机物有限,碳源不足而影响了 TN 的去除<sup>[17]</sup>;其次,可能是因为 HRT 过短,微生物不能充分进行反硝化作用。

## 2.3 砾石 O/A 区分段进水配比对去除效果的影响

### 2.3.1 砾石区

不同分段进水配比下,砾石区去除污染物的效果如图 5 所示。

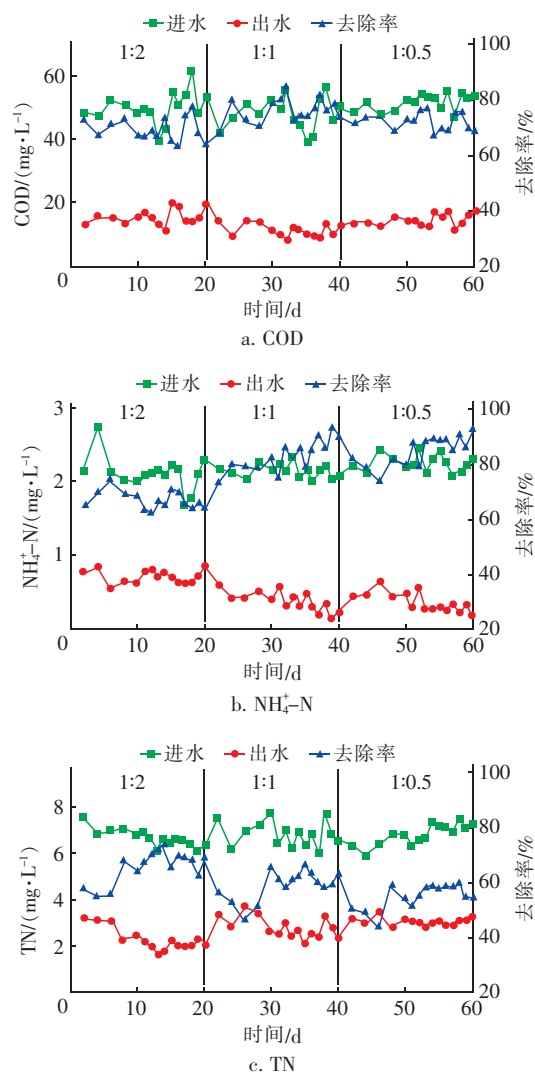


图5 不同分段进水配比下砾石区对污染物的去除效果

Fig.5 Removal effect of pollutants in gravel zone under different influent distribution ratios

随着砾石 O/A 区分段进水比例的增大,COD 去除率呈现先升高再降低的趋势。COD 在分段进水配比为 1:2 时的去除率最低,为 68.78%,是因为此

时砾石 A 区进水量较大,虽可满足反硝化的碳源需求,但由于反硝化速率和消耗碳源较慢,导致部分 COD 未被降解<sup>[19]</sup>。当进水配比为 1:1 时,COD 平均去除率最高,可达 77.39%,是因为在砾石 O 区的 COD 由好氧微生物快速吸收降解,进入砾石 A 区的 COD 满足反硝化菌对碳源的需求。分段进水配比对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除影响较大,硝化细菌对 DO 浓度极为敏感<sup>[20]</sup>, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除主要在 DO 较高的三部分完成:砾石 O 区、O 区和 A 区的连接处以及空气中氧进入到的砾石 A 区表面。当分段进水配比为 1:2 时,O 区对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除受到限制,大部分仅能依靠 O 区和 A 区连接处以及砾石 A 区表面的硝化细菌,去除率为 65.32%。进水配比为 1:1 和 1:0.5 时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率较高,分别为 84.91% 和 87.32%。

TN 在 1:2 分段进水配比下的去除率最高,平均为 68.5%,砾石 A 区的设计长度为 O 区长度的 2 倍,可以承载较大的水力负荷,且碳源相对充足,可以很好地为反硝化过程提供反应条件<sup>[21]</sup>。当进水比为 1:0.5 时,TN 去除率降为 56.67%,一方面由于砾石 O 区进水量较大,部分携带 DO 的水体进入砾石 A 区,破坏了缺氧环境,导致反硝化过程受到限制<sup>[22]</sup>;另一方面有机物在砾石 O 区被好氧微生物快速吸收降解,导致砾石 A 区反硝化细菌能够利用的碳源减少,反硝化不充分<sup>[19]</sup>。因此,可根据不同污染类型的水质灵活选择进水配比。

### 2.3.2 潜流人工湿地段

装置末端出水水质如图 6 所示。在此阶段,潜流人工湿地的 HRT 在 3 h 左右,装置末端出水 COD 平均浓度为 9.38 mg/L, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  平均浓度为 0.26 mg/L,均可以达到地表 II 类水标准。当复合工艺运行 1~20 d 时,砾石区采用的是 1:2 的分段进水配比,潜流人工湿地的进水 COD 浓度(砾石区出水)相较于之后分段进水配比为 1:1 和 1:0.5 时较高,湿地对 TN 的去除率相对于后两者的 21.09% 和 20.58% 较高,达到 24.47%,此阶段下装置对 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 的总去除率分别为 78.87%、80.08%、76.27%。这也解释了此次试验后置潜流人工湿地由于缺少碳源,异养型反硝化细菌不能更好地富集生长<sup>[23]</sup>,造成 TN 去除率不高的原因。

综上所述,由两次参数优化试验结果可得出,砾石区 HRT=5 h,砾石 O/A 区分段进水配比 1:1 为

较佳的运行参数,此时复合工艺对 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 的平均去除率分别为 83%、89%、73%。

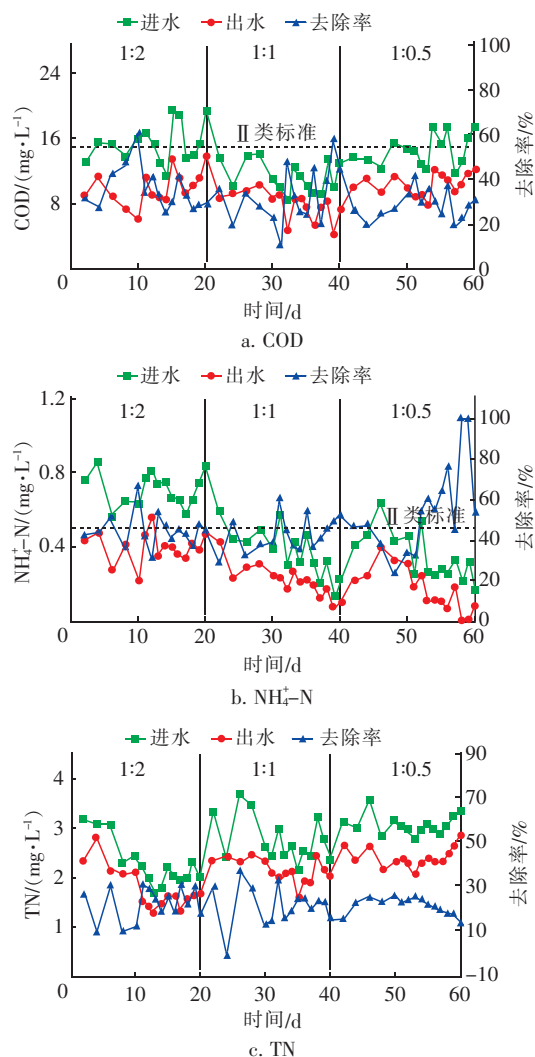


图6 不同分段进水配比下潜流人工湿地段对污染物的去除效果

Fig. 6 Removal effect of pollutants in subsurface flow constructed wetland under different influent distribution ratios

表 2 列举了微污染河道修复技术研究实例。可以看出生物接触氧化法设置 HRT 时间较短,对 COD 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效果较好,但不足之处在于对 TN 的去除效果有限。而人工湿地工艺对各污染物的去除效果均较好,但是也存在人工湿地的普遍弊端,HRT 较长、效率低下、占地面积较大。因此,砾间接触氧化/水平潜流人工湿地复合工艺弥补了砾间接触氧化区工艺对 TN 去除效果不佳的缺点和人工湿地 HRT 过长的缺点,是一种低能耗、低造价的人工强化生态型微污染河道水质提升工艺。

表 2 微污染河道修复技术研究实例比较

Tab. 2 Comparison of micro-polluted river restoration technical research examples

技术类型	参数条件	去除率/%		
		COD	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N	TN
砾间接触氧化技术 <sup>[24]</sup>	HRT = 2.5 h, O/A 区进水比值为 1 : 3	42.7	83.6	31.6
生物接触氧化技术 <sup>[25]</sup>	使用火山岩滤料, DO 浓度为 5 ~ 6 mg/L, 水力负荷为 5 ~ 7 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> · d)	80	70	50
生物接触氧化技术 <sup>[26]</sup>	使用软性填料和竹制填料, HRT = 1.5 h, 阶段曝气, DO 浓度为 3 mg/L	41 ~ 54	40 ~ 63	30 ~ 58
模拟河道生物反应器 <sup>[27]</sup>	使用弹性填料, HRT = 24 h	26.1	75	11.1
分段进水生物接触氧化法 <sup>[28]</sup>	使用弹性填料和组合填料, HRT = 5.4 h, 3 段分段进水比为 1 : 1 : 1, DO 浓度为 0.1 ~ 7.6 mg/L	50	60	20
水平潜流人工湿地 <sup>[29]</sup>	面积为 100 m <sup>2</sup> , 深度为 1 m, HRT = 44.4 h	79.8	86.5	70.5
纤维素碳源(玉米芯) + 水平潜流人工湿地 <sup>[1]</sup>	利用玉米芯作为纤维素碳源提高河水生化性, HRT = 24 h, 底部布设导气管	38.5	65.1	70.6
复合渗流试验法 <sup>[30]</sup>	设置四个格室, 前两格室下部填充腐木作为碳源, 后两格室填充水泥砖块, HRT = 1.5 d		85	36.34

3 结论

① 综合考虑,选择 5 h 为砾石区最佳水力停留时间。当进水 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N、TN 浓度分别为 50、2 和 7 mg/L 左右时,砾石区 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N、TN 平均去除率分别可达 72% 左右、75.28%、67.79%。后置水平潜流人工湿地 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N、TN 平均去除率分别为 31%、43%、28%,装置末端出水 COD 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 均可达到地表水 II 类标准。

② 砾石 O/A 区分段进水配比为 1 : 1 时,对 COD 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 的去除效果最佳,去除率分别为 77.39% 和 84.91%。分段进水配比为 1 : 2 时,砾石区 TN 去除率最高,达到 68.5%,经过后置串联的潜流人工湿地,整体装置对 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N、TN 的总去除率分别为 78.87%、80.08%、76.27%。因此在进行实际工程设计时,可根据不同河流的污染特征,灵活选用分段进水配比。

③ 综上所述,砾石区 HRT = 5 h,砾石 O/A 区分段进水配比为 1 : 1 是较佳的运行参数,此时复合工艺对 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N、TN 的平均去除率分别为 83%、89%、73%。

参考文献:

[ 1 ] 于鲁冀,陈涛,柏义生,等. 微污染水体水平潜流湿地强化脱氮研究[J]. 环境工程,2016,34(3):18 - 21.  
YU Luji, CHEN Tao, BAI Yisheng, *et al.* Enhanced nitrogen removal for micro-polluted water by using horizontal subsurface flow artificial wetland [ J ].

Environmental Engineering, 2016, 34 ( 3 ) : 18 - 21 ( in Chinese ).

[ 2 ] 徐祖信. 河流污染治理技术与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.

XU Zuxin. Technology and Practice of River Pollution Rehabilitation [ M ]. Beijing: China Water Power Press, 2003 ( in Chinese ).

[ 3 ] 颜昌宙,范成新,杨建华,等. 湖泊底泥环保疏浚技术研究展望[J]. 环境污染与防治,2004,26(3):189 - 192.

YAN Changzhou, FAN Chengxin, YANG Jianhua, *et al.* Prospect and progress of the study on environmental dredging technology of lake sediment [ J ]. Environmental Pollution & Control, 2004, 26 ( 3 ) : 189 - 192 ( in Chinese ).

[ 4 ] 陈异晖,和丽萍,赵祥华. 环境疏浚技术在星云湖的工程化应用[J]. 云南环境科学,2003,44(4):47 - 50.

CHEN Yihui, HE Liping, ZHAO Xianghua. Technology on environmental dredging engineering for pollution sediment in Xingyun Lake [ J ]. Yunnan Environmental Science, 2003, 44 ( 4 ) : 47 - 50 ( in Chinese ).

[ 5 ] 任海腾,左剑恶,黄帅辰,等. 生物填料床去除低温低污染河水中硝态氮及其微生物群落结构特征研究[J]. 广东化工,2019,46(15):1 - 4.

REN Haiteng, ZUO Jian' e, HUANG Shuaichen, *et al.* Nitrate removal from lower polluted river water by bio-packed bed reactors at lower temperature and their microbial community structure [ J ]. Guangdong Chemical

- Industry, 2019, 46(15): 1-4 (in Chinese).
- [6] 刘帅, 文韬, 马竞, 等. 基于多参数评价体系的三种人工湿地净化能力研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(12): 55-59.
- LIU Shuai, WEN Tao, MA Jing, *et al.* Study on purification ability of three kinds of constructed wetlands based on multi-parameter evaluation system[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(12): 55-59 (in Chinese).
- [7] 张太平, 陈韦丽. 人工湿地生态系统提高氮磷去除率的研究进展[J]. 生态环境, 2005, 14(4): 580-584.
- ZHANG Taiping, CHEN Weili. Advances in removal efficiency of nitrogen and phosphorus in constructed wetland ecosystem[J]. Ecology and Environment, 2005, 14(4): 580-584 (in Chinese).
- [8] 崔理华, 朱夕珍, 骆世明, 等. 几种人工湿地基质磷的吸附特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 894-898 (in Chinese).
- CUI Lihua, ZHU Xizhen, LUO Shiming, *et al.* The characteristic of phosphorous adsorption on different substrates used in constructed wetland[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(3): 894-898 (in Chinese).
- [9] 王曼. 接触氧化工艺对污染河道的脱氮性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
- WANG Man. Study of the Removal of Nitrogen of Polluted River by Bio-contact Oxidization Process[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012 (in Chinese).
- [10] 葛俊. 砾间接触氧化技术在洱海白鹤溪水质净化中应用研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2015.
- GE Jun. Research of Lightly Contaminated Water Application in Baihe River of Erhai Lake by Gravel Contact Oxidization Process[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2015 (in Chinese).
- [11] 徐京, 朱亮, 丁炜, 等. 挂膜方式对模拟河道生物反应器启动与稳态运行的影响[J]. 中国环境科学, 2010, 30(8): 1091-1096.
- XU Jing, ZHU Liang, DING Wei, *et al.* Effects of biofilm growing methods on start-up and performances for simulated river bioreactor[J]. China Environmental Science, 2010, 30(8): 1091-1096 (in Chinese).
- [12] 陈洪斌, 梅翔, 高廷耀, 等. 受污染源水生生物预处理挂膜过程研究[J]. 水处理技术, 2001, 27(4): 196-199.
- CHEN Hongbin, MEI Xiang, GAO Tingyao, *et al.* Study on biofilm colonization of polluted raw water biopretreatment[J]. Technology of Water Treatment, 2001, 27(4): 196-199 (in Chinese).
- [13] 方明亮. 低温条件下硝化污泥的驯化及其固定化[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- FANG Mingliang. Research on Cultivation and Immobilization of Nitrifying Activated Sludge in Low Temperature[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013 (in Chinese).
- [14] 张宏玉. MABR微生物群落结构的研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- ZHANG Hongyu. Research of Microbial Community Structure in MABR[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012 (in Chinese).
- [15] 徐富强, 桂梦瑶, 杜俊逸, 等. 典型工业污染物对好氧反硝化菌群脱氮性能及群落结构的影响[J]. 环境工程学报, 2019, 13(10): 2442-2450.
- XU Fuqiang, GUI Mengyao, DU Junyi, *et al.* Effects of typical industrial pollutants on the denitrification performance and the community structure of aerobic denitrifying bacteria[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(10): 2442-2450 (in Chinese).
- [16] 刘雨, 赵庆良, 郑兴灿. 生物膜法污水处理技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- LIU Yu, ZHAO Qingliang, ZHENG Xingcan. Biofilm Wastewater Treatment Technology[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000 (in Chinese).
- [17] 魏佳明. 表流湿地细菌及反硝化细菌群落结构研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
- WEI Jiaming. Characteristics of Bacteria and Denitrifying Bacteria Communities in Surface-flow Constructed Wetlands[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2017 (in Chinese).
- [18] 刘冰, 郑煜铭, 李清飞, 等. 复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5401-5410.
- LIU Bing, ZHENG Yuming, LI Qingfei, *et al.* Occurrence of denitrifying dephosphatation in a hybrid constructed wetland system and its stability[J]. Environmental Science, 2019, 40(12): 5401-5410 (in Chinese).
- [19] MERCEDES M C, BLANCA P U, SERRANO S, *et al.* Dynamics of protozoan and metazoan communities in a full scale wastewater treatment plant by rotating



- biological contactors [J]. Microbiological Research, 2001, 156(3): 225–238.
- [20] 焦玉佩,李意,刘启明,等. 膜曝气生物反应器对受污染地表水的处理效果[J]. 环境工程学报, 2017, 11(1): 85–92.
- JIAO Yupei, LI Yi, LIU Qiming, *et al.* Treatment effect of membrane-aerated biofilm reactor (MBR) on polluted surface water [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(1): 85–92 (in Chinese).
- [21] 张欣,吴浩汀,谢凯娜. 前置反硝化BAF工艺处理生活污水的脱氮试验研究[J]. 安全与环境工程, 2008, 15(1): 58–61.
- ZHANG Xin, WU Haoting, XIE Kaina. Experimental study on nitrogen removal of domestic sewage using BAF with pre-denitrification process [J]. Safety and Environmental Engineering, 2008, 15(1): 58–61 (in Chinese).
- [22] 王宁宁,赵阳国,孙文丽,等. 溶解氧含量对人工湿地去除污染物效果的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2018, 48(6): 24–30.
- WANG Ningning, ZHAO Yangguo, SUN Wenli, *et al.* Effect of dissolved oxygen on the removal of pollutants in artificial wetland [J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(6): 24–30 (in Chinese).
- [23] PENG D C, BERNET N, DELGENE J P, *et al.* Simultaneous organic carbon and nitrogen removal in an SBR controlled at low dissolved oxygen concentration [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2001, 76(6): 553–558.
- [24] 葛俊,胡小贞,庞燕,等. 砾间接触氧化法对白鹤溪低污染水体的净化效果[J]. 环境科学研究, 2015, 28(5): 816–822.
- GE Jun, HU Xiaozhen, PANG Yan, *et al.* Research on purifying lightly contaminated water in Baihe River by gravel contact oxidization process [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(5): 816–822 (in Chinese).
- [25] 王曼,李冬,张杰,等. 生物接触氧化用于河道治理的快速启动性能研究[J]. 水处理技术, 2011, 37(10): 27–31.
- WANG Man, LI Dong, ZHANG Jie, *et al.* Study on startup characteristic of bio-contact oxidation process for river sewage [J]. Technology of Water Treatment, 2011, 37(10): 27–31 (in Chinese).
- [26] 徐明建. 生物接触氧化强化脱氮净化微污染水源水的工艺优化实验与中试设计[D]. 福州:福建师范大学, 2017.
- XU Mingjian. Optimization of Nitrogen Removal by Biological Contact Oxidation Process for Purification of Micro-polluted Water and Pilot Design [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2017 (in Chinese).
- [27] 黄可谈,朱亮,李国平,等. 模拟河道生物反应器原位修复受污染水源水研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2009, 45(3): 295–300.
- HUANG Ketan, ZHU Liang, LI Guoping, *et al.* In-situ bioremediation of polluted source water with simulated river bioreactor [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2009, 45(3): 295–300 (in Chinese).
- [28] 李璐,温东辉,张辉,等. 分段进水生物接触氧化工艺处理河道污水的试验研究[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2227–2234.
- LI Lu, WEN Donghui, ZHANG Hui, *et al.* Pilot experiment on the treatment of the river wastewater by a step-feed biological contact process [J]. Environmental Science, 2008, 29(8): 2227–2234 (in Chinese).
- [29] 管升明,邓海龙,刘方平,等. 水平潜流人工湿地系统工程设计与应用——以江西省乐平市众埠镇上流源自然村为例[J]. 江西水利科技, 2017, 43(3): 193–197.
- GUAN Shengming, DENG Hailong, LIU Fangping, *et al.* Engineering design and application on the system of horizontal subsurface flow constructed wetlands—a case study of natural village in Zhongpu Town, Leping City, Jiangxi Province [J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2017, 43(3): 193–197 (in Chinese).
- [30] 袁腾,刘超翔,向衡,等. 复合式渗流试验装置对微污染河道水的脱氮除磷研究[J]. 环境工程, 2015, 33(4): 34–38.
- YUAN Teng, LIU Chaoxiang, XIANG Heng, *et al.* Study on treatment of micro-polluted river water by the composite flow test apparatus [J]. Environmental Engineering, 2015, 33(4): 34–38 (in Chinese).

作者简介:蒋宇豪(1994—),男,河南开封人,硕士,助理工程师,研究方向为市政给水排水、河道治理工程。

E-mail: henubjfujyh@163.com

收稿日期: 2020-01-14

修回日期: 2020-10-15

(编辑:孔红春)