

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.11.016

# 污水处理厂二级出水深床滤池超深度脱氮研究

镇祥华, 余琴芳, 万年红, 张立, 崔朋, 蔡世颜, 程珊  
(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 采用深床滤池处理污水厂二级出水, 以使出水 TN 提升至地表Ⅳ类水水质。在中试系统进水 TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的平均值分别为 13.88 和 0.68 mg/L、碳源(99%的乙酸)投加量为 60 mg/L 条件下, 当空床水力停留时间分别为 15 和 30 min 时, 出水 TN 平均值分别为 0.81、0.74 mg/L, TN 平均去除率分别为 94.16%、94.67%, 反硝化滤池的平均容积负荷为 0.64 ~ 1.28  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  (以硝态氮计)。当进水 TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的平均值分别升高至 18.05 和 1.40 mg/L、碳源投加量为 40 mg/L 时, 同样运行条件下出水 TN 平均值分别为 5.04 和 2.36 mg/L, 去除率分别为 72.08% 和 86.93%。中试结果表明, 控制二级出水 TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  分别在 15 和 0.5 mg/L 以内、空床水力停留时间为 30 min、碳源投加量(C/N 值=4.5)足够时, 深床滤池反硝化脱氮系统能稳定保证出水 TN 达到地表Ⅳ类水水质标准。

**关键词:** 污水处理厂; 二级出水; 深床滤池; 超深度脱氮; Ⅳ类地表水标准

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)11-0091-06

## Advanced Denitrification of Secondary Effluent of a Wastewater Treatment Plant in Deep Bed Filter

ZHEN Xiang-hua, YU Qin-fang, WAN Nian-hong, ZHANG Li, CUI Peng, CAI Shi-yan, CHENG Shan

(Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430010, China)

**Abstract:** The secondary effluent from a wastewater treatment plant was treated by a deep bed filter, so as to improve TN in the effluent to the surface water class Ⅳ criteria. When the average TN and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  concentrations in the influent of the pilot-scale system were 13.88 mg/L and 0.68 mg/L, dosage of the carbon source (99% acetic acid) was 60 mg/L and empty bed hydraulic retention time was 15 min and 30 min, the average TN concentrations in the effluent were 0.81 mg/L and 0.74 mg/L, the corresponding average removal rates were 94.16% and 94.67%, respectively, and the average volumetric loading rate was 0.64 ~ 1.28  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  (in terms of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ). When the average TN and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  concentrations in the influent increased to 18.05 mg/L and 1.40 mg/L, and the dosage of carbon source was 40 mg/L, the average TN concentrations in the effluent were 5.04 mg/L and 2.36 mg/L, and the removal rates were 72.08% and 86.93% under the same operational conditions. When TN and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  in the secondary effluent were controlled to be less than 15 mg/L and 0.5 mg/L, empty bed hydraulic retention time was 30 min and dosage of the carbon source (C/N = 4.5) was sufficient in the pilot-scale system, TN in the effluent of the deep bed filter denitrification system could always meet the surface water class Ⅳ criteria.

**Key words:** wastewater treatment plant; secondary effluent; deep bed filter; advanced denitrification; surface water class IV criteria

氮元素过量是造成水体富营养化的重要因素之一,因此我国水环境污染严重或经济发达地区制定了更加严格的适合本地实际情况的地方标准,如已经发布的《水污染物综合排放标准》(DB 11/307—2013)、《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB 51/2311—2016)和《巢湖流域城镇污水处理厂和工业行业主要水污染物排放限值》(DB 34/2710—2016)等,以确保本地区水环境质量持续改善。部分地区甚至要求排入相应水体的TN满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)IV类标准的限值(1.5 mg/L),例如滇池流域,昆明市许多污水处理厂需要满足1.5 mg/L的TN排放标准,这对污水厂二级出水的深度处理提出了更高的要求。

笔者接触的大部分运行效果良好的市政污水处理厂的二级出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 基本保持在1.0 mg/L左右,在0.5 mg/L以内也较为常见。因而,针对尾水TN中占绝大部分的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除就成了研究重点。笔者在二级出水的基础上,采用深床滤池超深度脱氮技术,使出水TN能够达到地表水IV类标准限值,旨在为南方温暖地区高标准排放工程化设计提供参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 原水水质

试验原水为珠海市新青水质净化厂中试CASS生物池的出水,具体水质参数:COD为24~50 mg/L、 $\text{BOD}_5$ 为1~3 mg/L、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为0.3~1.8 mg/L、TN为12.6~21.2 mg/L、SS为9.5~22.5 mg/L、TP为1.6~4.4 mg/L、pH值为6.8~7.5、水温为29~32℃。原水TN随进水不同有所波动,基本在15 mg/L左右, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 基本在1.5 mg/L以内。 $\text{BOD}_5$ 基本保持在3 mg/L以内,可生物利用碳源较少,必须人工投加碳源来保证反硝化作用的进行。

### 1.2 试验装置

中试工艺流程为CASS池出水→深床滤池→出水,试验装置如图1所示。试验规模为30~60 m<sup>3</sup>/d,单滤柱的直径为0.413 m、高度为6.03 m、有效过滤面积为0.168 m<sup>2</sup>,滤料层的高度为1.83 m,采用1.5~3.0 mm的石英砂。两滤柱均采用下向流过滤方式并联运行,水力负荷为3.7~7.4 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),

空床水力停留时间为15~30 min,反冲洗周期为24~48 h,反冲洗气冲强度为100 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),水冲强度为15 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),先气冲5 min,再气水冲10 min,最后水冲5 min。外加碳源为乙酸(99%),投加量根据进水水质确定。



图1 深床滤池装置

Fig. 1 Pilot-scale deep bed filter

### 1.3 分析检测项目及方法

COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、TN、TP和SS按照《水和废水监测分析方法》(第4版)测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 空床水力停留时间与碳源投量对脱氮的影响

试验中两根滤柱(1<sup>#</sup>柱、2<sup>#</sup>柱)并联运行,各自采用不同的空床水力停留时间。待深床滤池挂膜完成且装置连续稳定运行3周后,分析空床水力停留时间及碳源投加量对系统脱氮效率的影响。常见的外加碳源如甲醇,由于有毒、运输储存困难,已很少采用。杨敏等<sup>[1]</sup>分析了乙醇、乙酸和乙酸钠作为外加碳源的脱氮效果,结果表明乙酸是最佳的外加碳源,其作为一种快速易降解的有机物,不仅具有较强的反硝化效能,而且投加成本低,所以本试验采用乙酸作为碳源。试验共分为两个阶段,第I阶段和第II阶段的碳源投加量分别为60、40 mg/L,系统中TN的变化如图2所示。可知,当碳源投加量为60 mg/L时,深床滤池进水TN平均值为13.88 mg/L,1<sup>#</sup>柱和2<sup>#</sup>柱(空床水力停留时间分别为15、30 min)出水TN平均值分别为0.81、0.74 mg/L,均低于1.5 mg/L的标准限值,对TN的去除率分别为94.16%和94.67%。此阶段1<sup>#</sup>柱出水TN仅有一次最高值为

1.56 mg/L,略微超出了限值,2<sup>#</sup>柱出水 TN 最高值为 1.23 mg/L,在第 I 阶段均在标准限值以下。

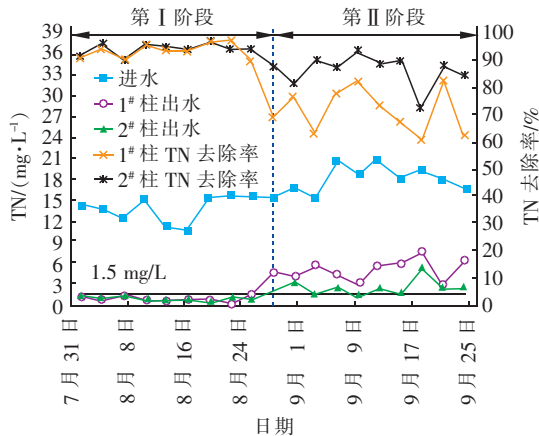


图2 不同滤柱中 TN 的变化

Fig.2 Change of TN in deep bed filters

当碳源投加量为 40 mg/L 时,由于进厂水 TN 浓度偏高,导致 CASS 池出水 TN 增加,此阶段深床滤池进水 TN 平均值为 18.05 mg/L,1<sup>#</sup>柱和 2<sup>#</sup>柱的出水 TN 平均值分别为 5.04、2.36 mg/L,对 TN 的去除率分别为 72.08%、86.93%。不同空床水力停留时间下深床滤池出水 TN 均超出 1.5 mg/L 的标准限值。除了碳源投加量(C/N 值为 2.8)不足外,系统进水 TN 偏高、超出污水处理厂普遍执行的 TN 一级 A 标准也是导致出水水质不能达标的重要原因之一。第 I 阶段进水 TN 最高值为 15.70 mg/L 时,出水 TN 分别为 0.36、0.84 mg/L,能够满足地表水 IV 类标准的限值(1.5 mg/L),建议深床滤池用于超深度脱氮时进水 TN 应控制在一级 A 标准以内。

当第 I 阶段碳源投加量(C/N 值为 4.5)充足时,深床滤池空床水力停留时间对反硝化脱氮的影响不大,对 TN 的去除率均在 94% 以上,但延长停留时间后出水水质更加稳定,达标率更高。当第 II 阶段碳源投加量(C/N 值为 2.8)不足时,空床水力停留时间对深床滤池反硝化效率的影响比较明显,30 min 停留时间下深床滤池对 TN 的去除率比 15 min 的去除率高 15%,出水 TN 平均值则低 53%。

当碳源投加量充足时,深床滤池出水 TN 浓度和空床水力停留时间关系不大;当碳源投加量不足时,较长的空床水力停留时间有利于 TN 的去除。可能原因在于,在较长的空床水力停留时间下,滤料表面反硝化菌生物膜生长成熟稳定,反硝化菌生物量较多,更有利于在较短的时间内从进水中竞争得

到碳源。而在较短的空床水力停留时间下,滤料表面的反硝化菌生物量相对较少,并且相同时间内进水携带的溶解氧量更多,导致更多的碳源被溶解氧消耗掉而实际用于反硝化的碳源减少。在实际工程中,通过适当延长空床水力停留时间可以在降低碳源投加量的情况下增加深床滤池的碳源利用率,提高 TN 去除率。

## 2.2 进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 对脱氮的影响

系统中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的变化如图 3 所示。可以看出,当第 I 阶段进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  保持在 1.0 mg/L 以下、平均值为 0.68 mg/L 时,经过深床滤池后,出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  有进一步降低的趋势,1<sup>#</sup>柱和 2<sup>#</sup>柱出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的平均值分别为 0.40 和 0.31 mg/L。这可能是由于深床滤池上层仍有硝化作用发生,进水端溶解氧在 3~4 mg/L,20 cm 滤层处溶解氧为 1.5 mg/L 左右,40 cm 滤层处溶解氧为 0.5 mg/L 左右,出水端溶解氧为 0.2 mg/L 左右。此阶段 1<sup>#</sup>柱和 2<sup>#</sup>柱的出水 TN 平均值分别为 0.81、0.74 mg/L,氨氮分别占 TN 的 49.4% 和 41.9%。可见,进水氨氮的高低对最终出水 TN 至关重要,为了使反硝化工艺出水 TN 降到极低水平,应在前序硝化阶段尽可能地降低  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度才能保证达标。

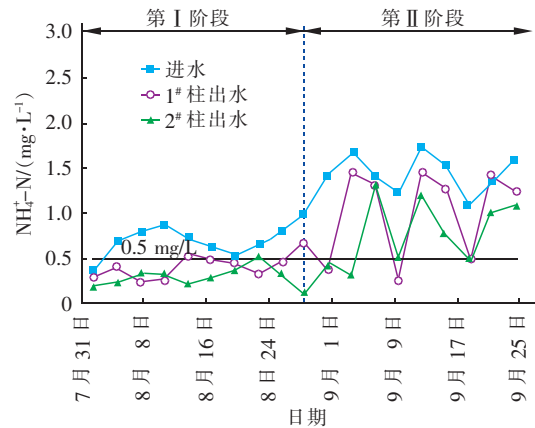


图3 不同滤柱中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的变化

Fig.3 Change of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  in deep bed filters

第 II 阶段由于进厂水 TN 升高,使得二级生物处理工艺 CASS 池出水水质效果变差,导致深床滤池的进水 TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度显著升高,此阶段进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  平均值为 1.40 mg/L,1<sup>#</sup>柱和 2<sup>#</sup>柱的出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  平均值分别为 1.00、0.73 mg/L,相应的出水 TN 平均值分别为 5.04 和 2.36 mg/L,氨氮占 TN 的比例分别为 19.8% 和 30.9%。



可见,出水 TN 越低, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  在 TN 中所占的比例就越高。为了使出水 TN 满足  $1.5 \text{ mg/L}$  的排放限值,应控制深床滤池进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  在足够低的水平。第 I 阶段出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  约占出水 TN 的 50%,考虑实际工程应用需要留有一定余量,深床滤池进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  应控制在  $0.5 \text{ mg/L}$  以内。

### 2.3 碳源投加对出水 COD 的影响

为了考察碳源的投加是否会导致出水 COD 增加,现场同步测定了深床滤池进出水 COD 的变化,结果如图 4 所示。可以看出,在碳源充足的条件下,进水 COD 平均值为  $37.22 \text{ mg/L}$ ,当空床水力停留时间分别为 15 和 30 min 时,出水 COD 分别为  $19.56$ 、 $24.89 \text{ mg/L}$ ,COD 去除率平均值分别为 46.8%、32.7%。在碳源不充足的条件下,进水 COD 平均值为  $36.90 \text{ mg/L}$ ,当空床水力停留时间分别为 15 和 30 min 时,出水 COD 分别为  $17.20$ 、 $17.40 \text{ mg/L}$ ,COD 去除率平均值分别是 54.8% 和 53.5%。可以看出,出水 COD 和停留时间关系不大,停留时间长的 COD 反而略高,但是最终出水 COD 都要明显低于进水。从碳源投加量来看,当碳源充足时,出水 COD 平均值为  $22.22 \text{ mg/L}$ ,COD 去除率为 40.3%;当碳源不充足时,出水 COD 平均值为  $17.30 \text{ mg/L}$ ,COD 去除率为 53.1%。可见,在碳源不足的情况下,出水 COD 降低更加明显。

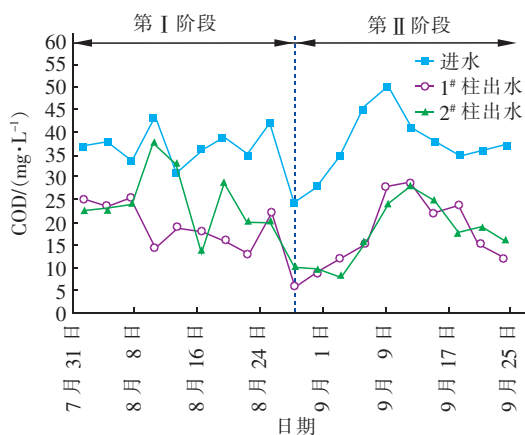


图 4 不同滤柱中 COD 的变化

Fig. 4 Change of COD in deep bed filters

从 SS/COD 值来看,当进水比值为 0.35 时,出水比值为 0.19~0.22,说明经过深床滤池后,SS 比 COD 的下降幅度更大,深床滤池更有利于 SS 的去除,同时也说明 COD 并不完全由非溶解性颗粒 COD 组成,还有相当一部分为难降解溶解性 COD。出水

SS 基本保持在  $4 \text{ mg/L}$  的检出限,难降解溶解性 COD 保持在  $18.32 \sim 20.95 \text{ mg/L}$  之间,其中过滤不能去除的 SS 约占总 SS 的 30.5%,难降解溶解性 COD 约占总 COD 的 49.4%~56.5%。上述结果表明,空床水力停留时间对 COD 的去除影响不大,适量的碳源(C/N 值为 4.5)投加也不会增加出水 COD,在深床滤池出水 SS 极低的情况下,COD 的去除主要依靠深床滤池的过滤截留功能,出水 COD 在很大程度上与水中溶解性 COD 有关,这些 COD 不能被过滤去除,仅和前端二级生物处理工艺有关,如果前级生物处理效果良好的话,溶解性 COD 基本以难生物降解 COD 为主。整个试验期间不存在外加碳源导致出水 COD 升高的情况,而且深床滤池的过滤截留功能可进一步降低出水 COD。

### 2.4 进出水 TN 组分分析

试验期间,对第 I、II 阶段进水及出水每周取样检测 1 次,每阶段检测 3 次,分析 TN 的组分。结果表明,第 I 阶段,进水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、有机氮浓度分别为  $12.21$ 、 $0.067$ 、 $0.64$ 、 $0.77 \text{ mg/L}$ ,所占 TN 的比例分别为 89.2%、0.5%、4.7% 和 5.6%;1#柱出水的相应指标分别为  $0.12$ 、 $0.026$ 、 $0.42$ 、 $0.28 \text{ mg/L}$ ,所占 TN 的比例分别为 14.2%、3.1%、49.6% 和 33.1%;2#柱出水的相应指标分别为  $0.11$ 、 $0.015$ 、 $0.34$ 、 $0.21 \text{ mg/L}$ ,所占 TN 的比例分别为 16.3%、2.2%、50.4% 和 31.1%。第 II 阶段,进水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、有机氮分别为  $14.26$ 、 $0.24$ 、 $1.32$ 、 $1.86 \text{ mg/L}$ ,所占 TN 的比例分别为 80.7%、1.4%、7.5% 和 10.5%;1#柱出水的相应指标分别为  $1.49$ 、 $0.88$ 、 $0.97$ 、 $1.47 \text{ mg/L}$ ,所占 TN 的比例分别为 31.0%、18.3%、20.2% 和 30.6%;2#柱出水的相应指标分别为  $0.49$ 、 $0.28$ 、 $0.68$ 、 $0.79 \text{ mg/L}$ ,所占 TN 的比例分别为 21.9%、12.5%、30.4% 和 35.3%。可以看出,进水 TN 中, $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的占比最高, $\text{NO}_2^- - \text{N}$  占比最低。相较于  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的占比,有机氮的占比略高。

当碳源投加充足时(第 I 阶段),出水 TN 中占比最多是  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,其次为有机氮。当 TN 浓度很低时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和有机氮是限制污水处理厂出水 TN 浓度更低的关键因素。Pagilla 等<sup>[2]</sup>发现,当出水 TN 浓度很低( $< 3 \text{ mg/L}$ )时,污水处理厂二级出水有机氮占 TN 的比例接近 50%,其中大部分氮以溶解性有机氮(DON)形态存在,同时认为出水有机氮是限

制污水处理厂出水 TN 浓度更低 ( $<3 \text{ mg/L}$ ) 的关键因素<sup>[3]</sup>。Hu 等<sup>[4]</sup>采用反硝化滤池处理二级出水,研究了不同 C/N 值(3、4、5、6)下对 DON 和生物可利用 DON (ABDON) 的去除特性,结果显示出水 DON 占出水 TN 的 31.2% ~ 39.8%,出水 DON 和 ABDON 最高浓度均出现在 C/N 值为 3 的运行条件下;当 C/N 值为 4、5、6 时,反硝化滤池出水 DON 浓度没有显著差异,但随着 C/N 值的增加,出水 ABDON 和 DON 生物利用度显著降低。

在第 I 阶段中,由于 CASS 生物池中氨化作用和硝化作用进行较为彻底,因此深床滤池进水中有机氮和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的含量均较低。经过深床滤池反硝化后  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  占比为 14.2% ~ 16.3%,浓度为 0.11 ~ 0.12 mg/L,进水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度对出水 TN 的影响不大,在碳源投加足量的情况下,深床滤池在 15 和 30 min 的空床水力停留时间下反硝化作用均能高效彻底地进行。

在第 II 阶段中,深床滤池进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和有机氮均偏高,深床滤池出水 TN 各组分占比最高的为有机氮、最低的为  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 。由于碳源投加量不足,深床滤池内反硝化作用进行不够彻底,导致出水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  偏高,同时  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  有增加的趋势。在碳源投加量不足的情况下,部分  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  会转变成  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ ,造成  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的积累。

通过两阶段出水 TN 的组分分析可以看出,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  占 TN 的 20.2% ~ 50.4%,有机氮占 TN 的 30.6% ~ 35.3%,共占出水 TN 的 50.8% ~ 85.7%。为了使深床滤池出水 TN 浓度足够低,首先需要前端二级生物处理的有机氮和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  转化足够彻底,其次当碳源投加量足够时,才能保证深床滤池超深度脱氮达到预期目标。

## 2.5 同期进出水 TP 及 SS 变化分析

滤池进出水 TP 和 SS 的变化如表 1 所示。可以看出,系统对 TP 的去除率非常高,在进水 TP 平均值为 2.41 mg/L 的条件下,1<sup>#</sup>柱和 2<sup>#</sup>柱的出水 TP 分别为 0.15 和 0.12 mg/L,去除率分别为 93.78% 和 95.02%。空床水力停留时间对 TP 的去除率影响不大,出水 TP 最高值分别为 0.31 和 0.21 mg/L,不需投加除磷剂就能满足更加严格的地方排放标准。对 SS 的去除率也显示了这一特点,当进水 SS 平均值为 13.1 mg/L 时,1<sup>#</sup>柱和 2<sup>#</sup>柱的出水 SS 均稳定保持在 4.0 mg/L 的检出限以内,去除率均为 69.47%。

可见,深床滤池在去除  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的同时,还能通过滤池在截留颗粒物的过程中显著去除 SS、COD 及 TP 等污染物。

表 1 深床滤池进出水 TP 和 SS 的变化

Tab. 1 Change of TP and SS in influent and effluent

项 目	进水	1 <sup>#</sup> 柱	2 <sup>#</sup> 柱
TP/ (mg · L <sup>-1</sup> )	最大值	4.45	0.31
	最小值	1.63	0.06
	平均值	2.41	0.15
TP 去除率/%		93.78	95.02
SS/ (mg · L <sup>-1</sup> )	最大值	22.5	4.0
	最小值	9.5	4.0
	平均值	13.1	4.0
SS 去除率/%		69.47	69.47

## 3 结论

① 在碳源投加量(C/N 值为 4.5)足够的条件下,深床滤池的反硝化能力与空床水力停留时间的关系不大,当空床水力停留时间分别为 15、30 min 时,对 TN 的去除率分别为 94.16% 和 94.67%,但是较长的空床水力停留时间有利于保证出水水质的稳定。在碳源投加量(C/N 值为 2.8)不足的条件,30 min 的空床水力停留时间下系统对 TN 的去除率比 15 min 的去除率高 15%,出水 TN 平均值低 53%,较长的空床水力停留时间有利于去除 TN。

② 进出水 TN 组分分析表明,当 TN 浓度很低时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和有机氮是限制污水处理厂出水 TN 浓度更低的关键因素。为了保证深床滤池出水 TN 足够低,应尽量优化前段二级生物处理系统,尽可能地使  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和有机氮转化成  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。

③ 深床滤池除了有非常好的反硝化去除 TN 作用外,还能通过滤池截留颗粒物的特性显著去除 SS、TP 和 COD 等污染物,去除率分别为 69.47%、93.78% ~ 95.02% 和 43.45% ~ 50.55%。

④ 南方温暖地区要想使出水 TN 满足地表水 IV 类水水质标准,前段二级生物处理应尽量将氨氮和有机氮转化成  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ,结合中试结果,同时考虑实际工程应留有一定余量,在确保二级出水  $\text{TN} \leq 15 \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N} \leq 0.5 \text{ mg/L}$  的基础上,建议的工程设计参考值如下:深床反硝化滤池的石英砂滤层厚为 1.8 ~ 2.5 m,石英砂粒径为 1.5 ~ 3.0 mm,碳源(99% 的乙酸)投量达到 C/N 值为 4 ~ 5,空床水力停留时间为 30 min,水力负荷为 3 ~ 4 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> · h),反硝化滤池的平均容积负荷  $\leq 0.60 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。

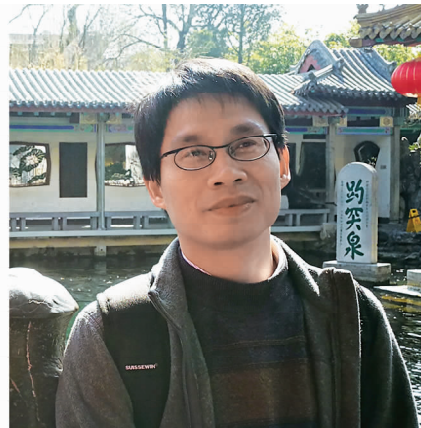
(以硝态氮计)。冲洗方式、强度以及冲洗周期可根据相关滤池设计规范并结合现场实际情况确定。一般反冲洗气冲强度为  $100 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 水冲强度为  $15 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 气冲 5 min、气水冲 10 min、水冲 5 min, 冲洗周期为 24 ~ 48 h。考虑到温度对生物处理工艺的影响较大, 在其他寒冷地区进行超深度脱氮时, 应通过试验来确定具体的运行参数以及最终出水 TN 值。

#### 参考文献:

- [1] 杨敏, 孙永利, 郑兴灿, 等. 不同外加碳源的反硝化效能与技术经济性分析[J]. 给水排水, 2010, 36(11): 125 - 128.  
Yang Min, Sun Yongli, Zheng Xingcan, *et al.* Denitrification efficiency and techno-economic analysis of different exotic additional carbon source [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(11): 125 - 128 (in Chinese).
- [2] Pagilla K R, Urgan-Demirtas M, Czerwionka K, *et al.* Nitrogen speciation in wastewater treatment plant influents and effluents—the US and Polish case studies[J]. Water Sci Technol, 2008, 57(10): 1511 - 1517.
- [3] Pagilla K R, Urgan-Demirtas M, Ramani R. Low effluent

nutrient technologies for wastewater treatment[J]. Water Sci Technol, 2006, 53(3): 165 - 172.

- [4] Hu H D, Liao K W, Geng J J, *et al.* Removal characteristics of dissolved organic nitrogen and its bioavailable portion in a postdenitrifying biofilter: Effect of the C/N ratio[J]. Environ Sci Technol, 2018, 52(2): 757 - 764.



作者简介: 镇祥华 (1977 - ), 男, 湖北松滋人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为水污染控制与资源化。

E-mail: gongda1996@163.com

收稿日期: 2019 - 11 - 12

(上接第 90 页)

with homogeneous Fenton-like oxidation for the removal of 2,4,4'-trichlorodiphenyl from soil contaminated with capacitor oil[J]. Environ Sci Pollut Res, 2016, 23(8): 7890 - 7898.

- [10] Qiu Y H, Xu M L, Sun Z Q. Remediation of PAH-contaminated soil by combining surfactant enhanced soil washing and iron-activated persulfate oxidation process [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(3): 441 - 443.
- [11] 魏巍, 李凤梅, 杨雪莲, 等. 电动修复过程中电压对土壤中芘降解及微生物群落的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(5): 1382 - 1388.  
Wei Wei, Li Fengmei, Yang Xuelian, *et al.* Influence of voltage on pyrene removal and microbial community in soil during electrokinetic remediation [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(5): 1382 - 1388 (in Chinese).



作者简介: 翟俊 (1977 - ), 男, 江苏溧阳人, 博士, 教授, 国际水协(IWA)人工湿地专业组委员、中国区协调人, 从事废水处理理论与技术研究。

E-mail: zhajun@cqu.edu.cn

收稿日期: 2019 - 11 - 18