

# 分段进水对人工快渗系统脱氮效率的影响

汪贵和<sup>1</sup> 方涛<sup>2\*</sup> 陈晓国<sup>1</sup> 唐巍<sup>2</sup> 朱文涛<sup>2</sup> 李威<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070; 2. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

**摘要** 为提高人工快速渗滤系统(CRI)的处理效率,研究了分段进水方式下以河砂/钢渣(1<sup>#</sup>)和河砂/天然沸石(2<sup>#</sup>)为填料两个快渗池中氮的垂直分布规律,以及对氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮及总氮四种形态的氮和COD<sub>Mn</sub>的去除效果。结果表明,1<sup>#</sup>池、2<sup>#</sup>池采用2:1的进水比例在表层下600 mm处分段进水对总氮的平均去除率分别为50.90%和45.93%,相对常规进水1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>池总氮去除率分别提高12.45%和12.23%,但对氨氮及COD<sub>Mn</sub>的去除率影响较小;1<sup>#</sup>池、2<sup>#</sup>池采用1:1的进水比例在表层下1000 mm处分段进水对总氮的平均去除率分别为47.80%和36.21%,相对常规进水1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>池总氮去除率分别提高9.35%和2.51%,但是对氨氮及COD<sub>Mn</sub>的去除率大幅下降。CRI系统中不同形态氮、DO及ORP垂直分布特征显示表层为好氧环境,有利于有机物的分解及硝化作用,底层为缺氧环境,有利于反硝化作用的顺利进行。此外,相对于天然沸石而言钢渣对污染物具有更好的去污效果。本研究表明,选取适当分段进水位置及进水比例是提高CRI系统对氮的去除率的有效途径。

**关键词** 快速渗滤 分段进水 脱氮 溶解氧

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2012)11-3999-07

## Impact of step-feed mode on removal of nitrogen in a constructed rapid infiltration system

Wang Guihe<sup>1</sup> Fang Tao<sup>2</sup> Chen Xiaoguo<sup>1</sup> Tang Wei<sup>2</sup> Zhu Wentao<sup>2</sup> Li Wei<sup>1</sup>

(1. School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China)

**Abstract** In order to improve the removal performance of constructed rapid infiltration (CRI) system, two CRI systems were operated with bank sand/steel slag (system 1) or bank sand/zeolite (system 2) as media material, respectively, and the effect of step-feed position and step-feed ratio on the removal efficiencies of nitrogen and COD<sub>Mn</sub> as well as the vertical distribution patterns of nitrogen in them were investigated. The results showed that when the step-feed ratio was 2:1 and step-feed position was at a depth of 600 mm below the surface, the TN removal efficiencies of system 1 and system 2 reached 50.90% and 45.93%, respectively, increasing by 12.45% and 12.23% compared with the normal flooding pattern, whereas no significant effect was observed for NH<sub>3</sub>-N and COD<sub>Mn</sub> removal. The TN removal efficiencies of system 1 and system 2 were 47.80% and 36.21%, respectively, increasing only by 9.35% and 2.51% when the step-feed ratio was 1:1 and the step-feed position was at 1000 mm depth, and the removal efficiencies of NH<sub>3</sub>-N and COD<sub>Mn</sub> decreased dramatically. The vertical distribution patterns of different forms of nitrogen, DO and ORP (oxidation-reduction potential) in CRI system suggested that the aerobic conditions in the upper layer favored nitrification and organic matter degradation, while the anoxic conditions in the bottom layer enhanced denitrification. Furthermore, the addition of steel slag was more efficient than zeolite in removing pollutants. These results implied that an improved nitrogen removal can be achieved through optimizing step-feed position and step-feed ratio in the CRI system.

**Key words** constructed rapid infiltration; step-feed mode; removal of nitrogen; dissolved oxygen

人工快速渗滤系统(CRI)是近十年来发展起来的一种新型污水处理工艺,它作为传统快渗系统的一种改良工艺,由于其占地面积小,基建及维护费用低,更由于其对BOD、COD、SS及TP等污染物具有较高的去除率,在城郊及农村生活污水处理中受到

基金项目:国家“水体污染控制与治理”科技重大专项(2012ZX07103-001);广东新高地建设专项工程资助(Y02601-I-401)

收稿日期:2011-11-17;修订日期:2012-02-23

作者简介:汪贵和(1986~),男,硕士研究生,主要从事水污染控制技术研究工作。E-mail:wgh198656@163.com

\* 通讯联系人,E-mail:fangt@ihb.ac.cn

了广泛的关注<sup>[1,2]</sup>。目前针对人工快渗池的研究多集中在运行参数的优化及结构的设计上,以期提高系统对污染物质的去除率。但人工快渗系统各部分进行硝化反硝化过程所需溶氧浓度不同以及底部碳源不足,使其对氨氮和总氮的去除率不是很理想<sup>[3,4]</sup>,尽管分段进水方式在A/O, A<sup>2</sup>/O等传统污水处理工艺中能明显提高总氮的去除率<sup>[5,6]</sup>,但其在人工快速渗滤系统中的研究鲜有报道。

本研究选取在水力负荷为1.0 m/d,湿干比均为1:2的运行参数下考察不同位置分段进水、不同进水比例及不同填料CRI系统中氨氮及硝氮的分布和转化规律,并结合DO及氧化还原电位(ORP)等参数对总氮的去除机理进行探讨,以期为提高CRI对氮的去除率提供依据。

## 1 实验部分

### 1.1 人工快速渗滤系统简介

系统建于巢湖双桥河河口附近的一条纳污河沟前,污水主要为附近村镇的生活污水及雨水,原水水质见表1。CRI单池尺寸为:L×B×H=1.0 m×1.0 m×2.0 m,共5个,具体结构参见图1。在2010年

表1 快渗系统进水水质

Table 1 Inflow water quality of CRI (mg/L)

	波动范围	平均值
NH <sub>3</sub> -N	1.17~10.23	5.06
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	0.002~0.22	0.03
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.002~2.56	0.39
TN	2.99~10.45	6.03
COD <sub>Mn</sub>	6.91~14.92	11.98

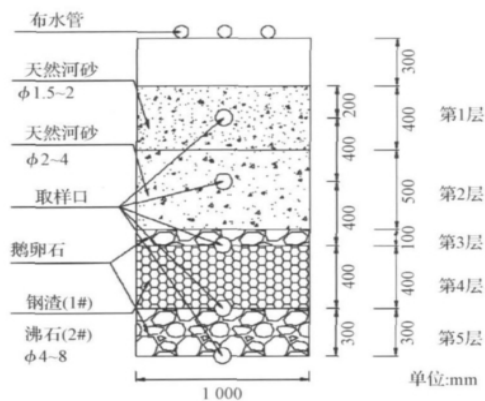


图1 快渗池结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CRI

夏季到秋季,已完成快渗池工艺参数的优化实验<sup>[7]</sup>。在此基础上,选取1<sup>#</sup>池和2<sup>#</sup>池进行分段进水实验(1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>快渗池第4层填料分别为钢渣和天然沸石)。

### 1.2 渗滤介质的来源和性质

天然河砂取自巢湖北岸;钢渣取自武钢集团的炼钢尾渣;天然沸石购自河南省巩义市夹津口华瑞水处理器材厂。天然河砂、钢渣及天然沸石的孔隙率和含水率分别为39.01%、44.91%及34.85%和11.59%、11.82%及5.89%。

### 1.3 运行方式

原污水经污水泵一次提升至沉淀池静置24 h后再次提升至高位槽,污水从高位槽沿管路流入1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>快渗池。第1段进水从快渗池顶部,采用穿孔管方式布水,单池布设3根穿孔管支管,每根间隔25 cm;第2段从总管分单管采用活接头接入距渗滤介质表层下600 mm或1 000 mm处取样口,设置阀门控制进水。

实验分为3个阶段,第1阶段为常规进水方式,即仅从快渗池表层布水。第2阶段为从快渗池表层和距快渗池表层下1 000 mm处取样口同时进水,并设置1:1、2:1和3:1共3个不同的进水比例。第3阶段为从快渗池表层和距快渗池表层下600 mm处取样口同时进水,设置1:1、2:1、3:1的3个不同的进水比例。3个阶段水力负荷均为1.0 m/d,湿干的时间比均为1 d:2 d,即淹水1 d,落干2 d的运行方式。

### 1.4 采样及分析

每个快渗池均设置有5个取样口,对应于相应填料层的出水,取样口具体位置参见图1。淹水1 d后,从5个取样口分取各层出水,同时取沉淀池(进水)水样并对如下指标进行监测。

COD<sub>Mn</sub>:高锰酸钾酸性氧化法;TN:碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;NH<sub>3</sub>-N:纳氏试剂比色法;NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N:N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N:紫外分光光度法<sup>[8]</sup>。ORP和pH采用YSI pH100型ORP/温度测量仪测定;DO采用YSI pro20便携式溶氧仪测定。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 分段进水对CRI系统去污效果的影响

#### 2.1.1 分段进水位置的影响

表2是CRI系统在不同分段进水位置及进水比例下对污染物的去除率(去除率由沉淀池进水及快

表 2 不同分段进水位置及进水比例下对污染物去除率 (%)

Table 2 Removal efficiency of pollutants at different step-feed position with varied step-feed ratios (%)

进水位置	600 mm			1 000 mm			常规	
	1:1	2:1	3:1	1:1	2:1	3:1		
1 号池	氨氮	82.78 ± 1.41	88.45 ± 8.42	97.11 ± 1.93	55.99 ± 3.21	67.75 ± 10.54	72.81 ± 17.08	85.35 ± 2.48
	总氮	40.53 ± 0.06	50.90 ± 6.35	33.28 ± 3.25	47.80 ± 1.31	31.43 ± 0.35	34.50 ± 4.47	38.45 ± 5.47
	COD <sub>Mn</sub>	64.54 ± 1.92	62.58 ± 0.79	68.79 ± 0.88	39.66 ± 9.24	33.26 ± 1.42	50.23 ± 24.28	67.42 ± 3.35
2 号池	氨氮	79.38 ± 10.18	78.77 ± 15.94	90.95 ± 4.18	52.08 ± 1.21	76.48 ± 1.41	76.37 ± 19.50	79.93 ± 7.31
	总氮	38.13 ± 2.92	45.93 ± 8.76	27.84 ± 3.86	36.21 ± 3.72	27.52 ± 0.77	18.38 ± 2.03	33.70 ± 13.61
	COD <sub>Mn</sub>	59.10 ± 1.46	56.50 ± 4.27	61.85 ± 2.14	32.64 ± 14.08	31.39 ± 4.69	45.96 ± 21.83	68.07 ± 12.62

渗池最底层出水的数据计算得到)。由表 2 知 1<sup>#</sup>对 NH<sub>3</sub>-N 和 COD<sub>Mn</sub> 的去除率由高到低的进水方式依次是在 600 mm 处分段进水、常规进水和在 1 000 mm 处分段进水。在 600 mm 处分段进水 NH<sub>3</sub>-N 和 COD<sub>Mn</sub> 的最高平均去除率为 97.11%、68.79%，均高于常规进水及在 1 000 mm 处分段进水对 NH<sub>3</sub>-N 和 COD<sub>Mn</sub> 的平均去除率 (85.35%、67.42% 和 72.81%，50.23%)。在 1 000 mm 处分段进水对 NH<sub>3</sub>-N 和 COD<sub>Mn</sub> 的去除率大幅下降主要是由于在 1 000 mm 处分段进入的污水仅通过了一层渗滤介质，其对污染物的吸附量有限；另外，可能是该层位于快渗池底部且处于缺氧段，微生物的种类和数量较上层都有所减少<sup>[9, 10]</sup>，导致 NH<sub>3</sub>-N 和 COD<sub>Mn</sub> 不能得到有效去除。2<sup>#</sup>对 NH<sub>3</sub>-N 的去除规律与 1#池类似，但分段进水后其对 COD<sub>Mn</sub> 的去除率普遍较低。可能是由于天然沸石的孔隙率较低，不利于微生物的附着和生长，因而在缺氧段微生物数量不足也限制了有机物的分解效率。

谢宇轩等<sup>[10]</sup>与王禄等<sup>[11]</sup>的研究表明，原水中氨氮及有机物等污染物在快渗池表层即可得到有效去除，快渗池底部微生物由于缺乏营养物质互相竞争，抑制了对环境敏感的微生物如反硝化菌的生长，相应的使相关污染物得不到有效去除。采取分段进水策略使原水中污染物在快渗池中的分布规律得以重排，从而有效发挥快渗池各层的作用。但是在同一水力负荷下，采取分段进水相当于增大原水在快渗池中的渗滤速率，降低原水与微生物及填料颗粒间的接触时间，因此，合适的分段进水位置对保证快渗池的出水水质是十分必要的。

### 2.1.2 分段进水比例的影响

由表 2 知，1<sup>#</sup>氨氮的去除率随着进水比例的增加而增大。在 600 mm 处和 1 000 mm 处分段进水时，1<sup>#</sup>氨氮去除率从进水比例 1:1 时的 82.78%、

55.99% 增加到进水比例 3:1 时的 97.11%、72.81%。2<sup>#</sup>氨氮的去除率随着进水比例的增加也大体上呈增加的趋势。氨氮的去除机理主要包括淹水期渗滤介质对氨的吸附作用，以及在落干期微生物群落对氨的硝化反硝化作用<sup>[12]</sup>。由于一定环境条件下(渗滤介质的性质，水力停留时间及温度)渗滤介质对氨氮的吸附量有限，因而氨氮的去除主要依靠硝化细菌的硝化反硝化作用<sup>[13, 14]</sup>。快渗池表层含有大量微生物和充足的溶氧，更有利于硝化作用的进行，故进水比例增大在一定程度上能增强系统对氨氮的去除效果。

当分段进水比例增加到 3:1 时，快渗系统对 COD<sub>Mn</sub> 的去除率明显提高，尤其是在 1 000 mm 处分段进水时，1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> COD<sub>Mn</sub> 去除率从进水比例 1:1 时的 39.66%、32.64% 增加到进水比例 3:1 时的 50.23%、45.96%。表明快渗池底部对有机物的分解不足，可能是因为底部微生物数量较少，在缺氧条件下进行的厌氧呼吸效率较低，不能有效利用有机物，同时也说明有机物的去除主要发生在快渗池的表层。

在 600 mm 处分段进水总氮去除率随进水比例的增大呈现出先增大后减小的趋势。相对常规进水，进水比例 1:1 和 2:1 均能提高总氮去除率。1<sup>#</sup>总氮去除率由原来的 38.45% 分别提高至 40.53% 和 50.90%，2<sup>#</sup>总氮去除率由原来的 33.70% 分别提高至 38.13% 和 45.93%。进水比例为 2:1 时较 1:1 更能有效提高脱氮效率，可能是由于此时系统中的碳源更加充分，反硝化作用更强导致的，另外，从 COD<sub>Mn</sub> 去除率的降低也可证明该点；当进水比例进一步增加到 3:1 时总氮去除率下降，可能是因为进入缺氧段的碳源不足，使硝氮得不到有效的去除。在 1 000 mm 处分段进水总氮去除率随进水比例的增大呈现出逐渐减小的趋势。相对常规进水，进水比例 1:1 能提高总氮的去除率，1<sup>#</sup>总氮去除率由原

来的 38.45% 提高至 47.80% ,2<sup>#</sup>总氮去除率由原来的 33.70% 提高至 36.21% ,该结果与 Wang 等<sup>[4]</sup> 的结论一致,但由于分段进水位置设置过低,使得 NH<sub>3</sub>-N 和 COD<sub>Mn</sub> 的去除率大幅降低。

上述研究结果表明,采取合适的分段进水比例,分段进水策略能有效提高总氮去除率。与常规进水相比,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>采用 2:1 的进水比例在 600 mm 处分段进水对总氮的平均去除率分别提高 12.45% 和 12.23%。1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>采用 1:1 的进水比例在 1 000 mm 处分段进水对总氮的平均去除率分别提高 9.35% 和 2.51%。总氮的去除机理主要是生物硝化反硝化作用<sup>[3, 15]</sup>,好氧段的硝化作用和缺氧段的反硝化作用之间的协调性对总氮的去除非常重要,因此适宜的进水比例才能加强硝化反硝化作用提高脱氮效率。

## 2.2 氮的垂直分布

### 2.2.1 氨氮的垂直分布

原水中氮主要以氨氮的形式存在,另外原水中有机氮经氨化细菌的作用也可转化成为氨氮,氨氮的随意排放会对环境造成重大的危害,如引起水体富营养化,游离态的氨易引起水生生物的氨中毒。因而对氨氮浓度的限制已成为排放水中重要的控制指标。

图 2 和图 3 分别是 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>在不同进水比例下 4

种形态的氮的垂直变化。由图 2 和图 3 知,氨氮浓度随着渗滤层深度的增加基本上是逐渐减小的,分段进水位置的不同对氨氮的去除规律并没有很大影响。在第 1 层,氨氮浓度下降十分显著,1<sup>#</sup>该层氨氮浓度降低了 61.18% ,2<sup>#</sup>氨氮浓度也降低了 47.37%。另外,从 1 000 mm 处分段进水时,第 2 层渗滤介质对氨氮也有很好的去除效果,1<sup>#</sup>该层削减的氨氮占到全部去除氨氮的 22.13% ,2<sup>#</sup>更是达到 33.79%。这主要和上层中良好的溶氧状况及大量的微生物密切相关。在第 4 层氨氮浓度会小幅上升,可能是由于虽然第 4 层填料钢渣、天然沸石较天然河砂对氨氮具有更高的吸附量,但渗滤介质对氨氮的吸附量有限,氨氮的去除主要还是依靠硝化细菌的硝化反硝化作用,而该层处于缺氧段,对氨氮的硝化作用不足,导致氨氮浓度的升高。

进水比例降低会使分段进水处氨氮浓度出现波动,尤其当分段进水位置设置较低,位于系统的缺氧段,微生物作用受到限制,快渗池对氨氮的去除主要依靠填料的吸附作用,受环境因素的影响较大,造成出水氨氮浓度的波动。图 2(d) 和图 3(d) 中,氨氮浓度在第 3 层的升高可能是由于分段进水比例低导致该层氨氮负荷过高,浓度上升<sup>[16]</sup>。

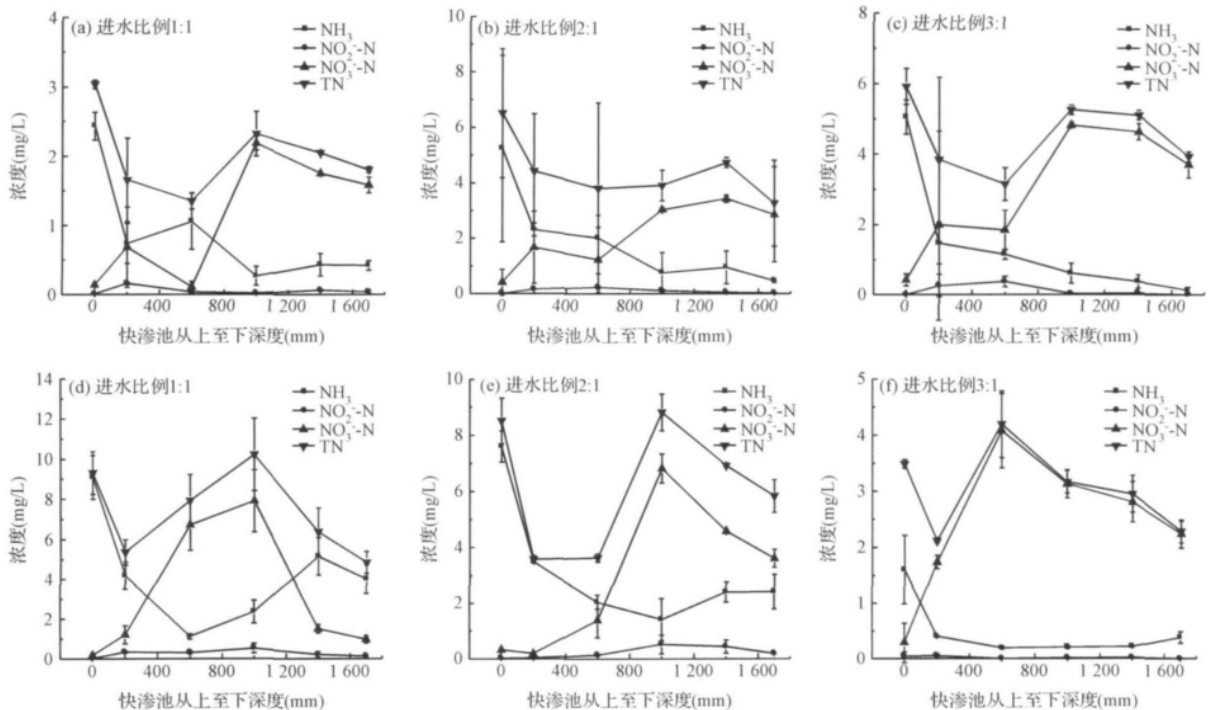
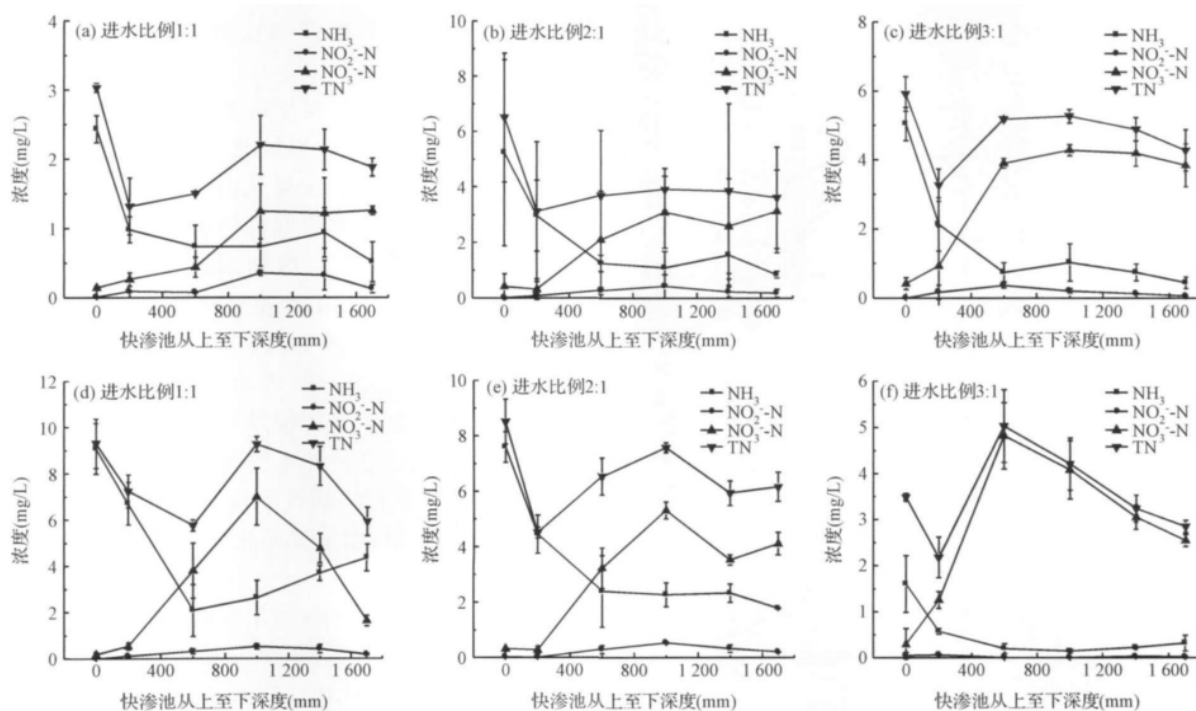


图 2 1<sup>#</sup>在不同进水比例下 4 种形态的氮的垂直变化

a,b,c 图是在 600 mm 处分段进水; d,e,f 图是在 1 000 mm 处分段进水

Fig. 2 Variations of different forms of nitrogen along CRI depth at different step-feed ratios in system 1



a, b, c 图是在 600 mm 处分段进水; d, e, f 图是在 1 000 mm 处分段进水

图 3 2<sup>#</sup>在不同进水比例下 4 种形态的氮的垂直变化

Fig. 3 Variation of different forms of nitrogen along CRI depth at different step-feed ratios in system 2

### 2.2.2 硝氮的垂直分布

除图 2(f) 和图 3(f) 外,其他图中硝氮浓度均在第 3 层达到最大值。表明微生物硝化作用主要发生在第 1 层到第 3 层之间,即表层下 100 cm 以内。Zou 等<sup>[16]</sup>研究表明硝化作用主要发生在表层下 20 cm 以内。由于采用了干湿交替的运行方式,使快渗池在落干期能有效复氧,因而加强了表层微生物的硝化作用<sup>[17]</sup>。由于硝氮和土壤颗粒均带负电,故反硝化不完全的硝氮不能被土壤颗粒吸附而随出水排除系统,从而腾出了土壤的吸附位,为下次进水氨氮的吸附提供条件。

图 2(f) 和图 3(f) 中第 2 层硝氮浓度的迅速升高甚至于超出进水总氮,可能是由于进水中氨氮浓度较低,使前期渗滤介质吸附的氨氮也参与了硝化作用<sup>[13]</sup>,进而使硝氮浓度迅速升高。硝氮浓度在第 4 层有所下降,是由于此时快渗池处于厌氧环境,另外分段进水方式提高了该层的 C/N 比,加强了微生物的反硝化作用将硝氮转化为 N<sub>2</sub> 和 N<sub>x</sub>O 等气体。

### 2.2.3 总氮的垂直分布

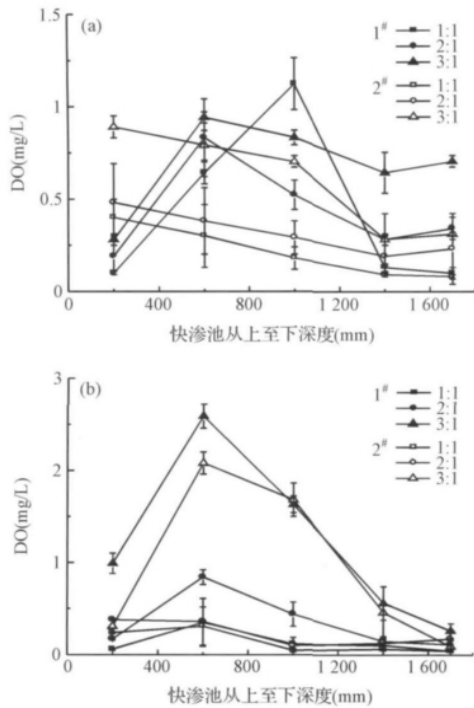
在快渗池第 1 层中有机氮经由氨化细菌转化成氨氮,氨氮浓度在土壤吸附和硝化细菌的共同作用下急剧下降,而硝氮浓度变化不很明显,因而在第 1

层中总氮有大幅的下降。在第 2 层中由于硝化作用的加强,硝氮浓度大幅上升,导致总氮浓度的增加。在第 3 层中,虽然由于 DO 的降低使快渗池处于缺氧状态,部分硝氮在反硝化作用下转化为亚硝氮,但此时硝化作用仍远强于反硝化作用,总氮浓度进一步增加,并在大部分实验中处于最高值。在第 4 层和第 5 层,由于分段进水为反硝化作用提供了部分的碳源,而且由于该系统中设置了饱水带的结构,使生活污水在第 4 层的停留时间增加<sup>[18]</sup>,因而反硝化作用得以加强,硝氮浓度降低,故而总氮浓度降低。

## 2.3 DO、ORP 的变化

### 2.3.1 DO 的变化

快渗池中 DO 的含量高低对污染物的去除有非常重要的作用。为进一步探讨氮在 CRI 系统中的去除规律,在采取水样的同时我们测定了 DO 浓度。由图 4 可知,DO 浓度受分段进水位置的影响较小,但是会随着分段进水比例的增加而增大。CRI 系统中氧主要来自落干期的大气复氧和进水中所含的溶氧,而主要消耗于污染物的降解,包括有机物的分解和硝化作用。分段进水比例增大使原水中有机物更多的在通过快渗池表层时得到去除,在快渗池中下部微生物对有机物的有氧呼吸减少,进而使 DO 浓度增大。



a 图是在 600 mm 处分段进水;  
 b 图是在 1000 mm 处分段进水  
 图 4 快渗池中 DO 的沿程变化

Fig. 4 Distribution of DO along CRI

1#中第2层和第3层 DO 基本能维持在 0.5 ~ 1.0 mg/L,使氨氮能较充分地转化成硝氮,然而在第4层和第5层,进水比例为3:1的 DO 浓度仍然高于 0.50 mg/L,加上碳源不足的限制,限制了反硝化作用的进行;比例为1:1和2:1时 DO 则维持在较低水平(0.25 mg/L左右),因而提高了总氮的去除效率。2#中虽然在第4、5层中 DO 较低,但在第2、3层中 DO 不足(低于 0.5 mg/L),硝化作用不完全,因而限制了总氮的去除率<sup>[3]</sup>。图4(b)中分段进水比

例为3:1时 DO 一直维持在较高水平,导致渗滤池各层硝氮浓度均很高。

1#快渗池中,DO 浓度呈现出先增加后降低的趋势;2#快渗池中,DO 浓度则呈现出逐渐下降的趋势。DO 浓度在第1层较低,主要是由于第1层渗滤介质中好氧微生物分解原水有机物而大量消耗氧气导致的。DO 浓度在第2层增加,是因为该层渗滤介质较第1层粒径更大,复氧效果较好;另外,原水到达该层时有机物大量减少,对 DO 的消耗降低进而使该层 DO 浓度增大。DO 浓度在底层较低是因为快渗池的结构使复氧过程较难达到底层,另外,有机物分解消耗氧气也会使原水携带的 DO 在达到底层时较低,但同时形成的缺氧环境有利于反硝化细菌对其他菌群的竞争,增加反硝化效率。

2.3.2 ORP 的变化

氧化还原电位是影响硝化反硝化的一个重要因素。分别于进水完成后 1 h、8 h 和 20 h 时测定 2 个快渗池各取样口的 ORP。图 5 是快渗池在 1000 mm 处分段进水时采取不同进水比例的 ORP 变化图。由图可知在进完水后随着时间的推移快渗池各层 ORP 总体上呈先减小后增加的趋势。

在快渗池第1层由于氧气的大量消耗导致 ORP 值降低;随着有机物消耗氧气量的减少,第2层 ORP 值增大;由于部分原水在第3层进入快渗池,使 ORP 值急剧下降;第4层和第5层 ORP 值虽缓慢增加,但仍处于反硝化作用区域(-100 ~ 100 mV) (进水比例3:1的情况除外)。随着进水比例的增加快渗池第3层 ORP 的下降趋势逐渐平缓,快渗池底部 ORP 也逐渐增大,快渗池缺氧段不能维持稳定的还原环境,影响了反硝化菌对硝氮的去除,使出水总氮的去除率降低。

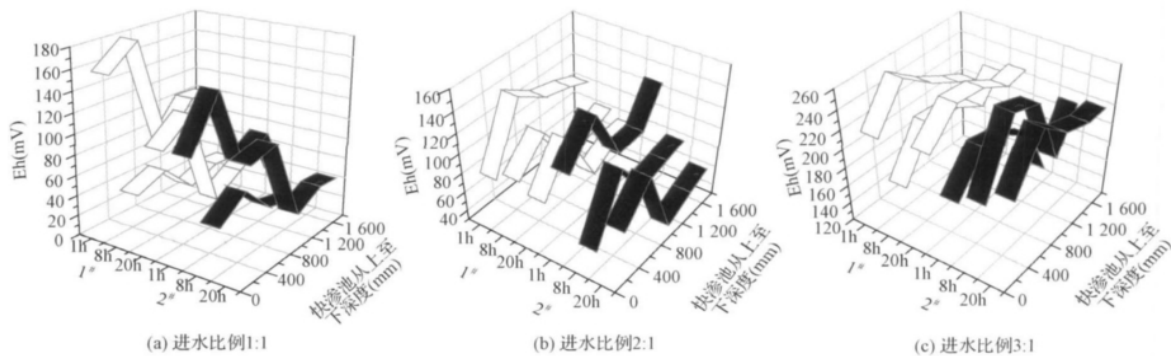


图 5 在 1000 mm 分段进水完成后 1 h、8 h 和 20 h 时两个快渗池沿程 ORP 变化

Fig. 5 Variation of ORP along CRI at 1 h, 8 h, 20 h after flooding with step-feed position at 1000 mm below surface

### 3 结 论

(1) 分段进水位置影响 CRI 系统对污染物的去除效果。对  $\text{NH}_3\text{-N}$  和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  去除率由高到低的进水方式依次是在 600 mm 处分段进水、常规进水和在 1 000 mm 处分段进水。对 TN 的去除率基本也符合上述规律,但同时还受到进水比例变化的影响。

(2)  $\text{NH}_3\text{-N}$  的去除率随着进水比例的增加大体上呈增加的趋势, $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除率在进水比例为 3:1 时最高。进水比例对 TN 去除率的影响受分段进水位置的影响,当在 600 mm 处分段进水时,TN 去除率随进水比例的增大呈现出先增大后减小的趋势,但在 1 000 mm 处分段进水时呈现出逐渐减小的趋势。

(3) DO 是影响快渗系统脱氮的重要因素之一。在快渗池中上层 DO 较高,有利于充分的硝化作用,将氨氮转变成硝氮;在快渗池底层 DO 较低,有利于反硝化作用,将硝氮转化成氮气等气体排出系统。

因此,在实际应用中可针对不同的来水水质,特别是碳源不足的情况下,选取适当分段进水位置及进水比例可提高 CRI 系统对氮的去除率。

### 参 考 文 献

- [1] Wang D., Zhang Z., Li X., et al. A full-scale treatment of freeway toll-gate domestic sewage using ecology filter integrated constructed rapid infiltration. *Ecological Engineering*, **2010**, 36 ( 6 ): 827-831
- [2] Heistad A., Paruch A. M., Vrale L., et al. A high-performance compact filter system treating domestic wastewater. *Ecological Engineering*, **2006**, 28 ( 4 ): 374-379
- [3] Zhang J., Huang X., Liu C., et al. Nitrogen removal enhanced by intermittent operation in a subsurface wastewater infiltration system. *Ecological Engineering*, **2005**, 25 ( 4 ): 419-428
- [4] Wang X., Sun T., Li H., et al. Nitrogen removal enhanced by shunt distributing wastewater in a subsurface wastewater infiltration system. *Ecological Engineering*, **2010**, 36 ( 10 ): 1433-1438
- [5] 王伟, 彭永臻, 殷芳芳, 等. 改进分段进水 A/O 生物脱氮工艺强化生物除磷. *环境科学*, **2009**, 30 ( 10 ): 2968-2974  
Wang wei, Peng Yongzhen, Yin Fangfang, et al. Modified step-feed A/O biological nitrogen removal process for enhanced phosphorus removal. *Environmental Science*, **2009**, 30 ( 10 ): 2968-2974 ( in Chinese )
- [6] 王佳伟, 郑江, 周军, 等. 基于碳源需求的  $\text{A}^2/\text{O}$  工艺分段进水研究. *中国给水排水*, **2010**, 26 ( 11 ): 47-50  
Wang Jiawei, Zheng jiang, Zhou jun, et al. Step-feed in  $\text{A}^2/\text{O}$  process based on carbon source demand. *China Water & Wastewater*, **2010**, 26 ( 11 ): 47-50 ( in Chinese )
- [7] 朱文涛, 司马小峰, 余林鹏, 等. 新型人工快速渗滤系统处理村镇污水工艺参数优化. *环境工程学报*, **2012**, 6 ( 5 ): 1459-1466  
Zhu Wentao, Sima Xiaofeng, Yu Linpeng, et al. Optimizing operational parameters of new constructed rapid infiltration system in villages and towns wastewater treatment. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2012**, 6 ( 5 ): 1459-1466 ( in Chinese )
- [8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第 4 版). 北京: 中国环境科学出版社, **2002**
- [9] Schaub S. A., Sorber C. A. Virus and bacteria removal from wastewater by rapid infiltration through soil. *Applied and Environmental Microbiology*, **1977**, 33 ( 3 ): 609-619
- [10] 谢宇轩, 康爱彬, 李明, 等. 三级人工快渗系统脱氮效果及菌种分布分析. *环境工程学报*, **2010**, 4 ( 6 ): 1271-1275  
Xie Yuxuan, Kang Aibin, Li Ming, et al. Analysis of denitrification and distribution of microbial strain in three stages constructed rapid infiltration system, *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2010**, 4 ( 6 ): 1271-1275 ( in Chinese )
- [11] 王禄, 喻志平, 赵智杰. 人工快速渗滤系统氨氮去除机理. *中国环境科学*, **2006**, 26 ( 4 ): 500-504  
Wang Lu, Yu Zhiping, Zhao Zhijie. The removal mechanism of ammoniac nitrogen in constructed rapid infiltration system. *China Environmental Science*, **2006**, 26 ( 4 ): 500-504 ( in Chinese )
- [12] Cho K. W., Song K. G., Cho J. W., et al. Removal of nitrogen by a layered soil infiltration system during intermittent storm events. *Chemosphere*, **2009**, 76 ( 5 ): 690-696
- [13] Lei X., Fujimaki H., Lu Y., et al. Ammonia removal from pretreated methane fermentation effluent through a soil trench system: A column experiment. *Chemosphere*, **2007**, 66 ( 11 ): 2077-2086
- [14] Yamaguchi T., Moldrup P., Rolston D., et al. Nitrification in porous media during rapid, unsaturated water flow. *Water Research*, **1996**, 30 ( 3 ): 531-540
- [15] Albuquerque A., Oliveira J., Semiteia S., et al. Influence of bed media characteristics on ammonia and nitrate removal in shallow horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Bioresource Technology*, **2009**, 100 ( 24 ): 6269-6277
- [16] Zou J., Dai Y., Sun T., et al. Effect of amended soil and hydraulic load on enhanced biological nitrogen removal in lab-scale SWIS. *Journal of Hazardous Materials*, **2009**, 163 ( 2-3 ): 816-822
- [17] Li Y., Li H., Sun T., et al. Study on nitrogen removal enhanced by shunt distributing wastewater in a constructed subsurface infiltration system under intermittent operation mode. *Journal of Hazardous Materials*, **2011**, 189 ( 1-2 ): 336-341
- [18] 刘家宝, 杨小毛, 王波, 等. 改进型人工快渗系统处理污染河水中试. *中国给水排水*, **2006**, 22 ( 13 ): 14-17  
Liu Jiabao, Yang Xiaomao, Wang Bo, et al. Pilot-scale study on improved constructed rapid infiltration system for polluted river water treatment. *China Water & Wastewater*, **2006**, 22 ( 13 ): 14-17 ( in Chinese )