

煤渣及生物基质渗滤系统强化脱氮研究

严群^{1*}, 张越², 汪宏¹, 卢艳秋¹

(1. 江西理工大学建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000;

2. 江西理工大学资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要:为强化地下渗滤系统(SWIS)的脱氮效果,建立了1[#]土壤、生物基质分层装填和2[#]土壤、煤渣分层装填的2套SWIS,对比分析了煤渣和生物基质对SWIS污水处理效果的影响。2系统在20 cm/d运行稳定后,1[#]装置的COD、总磷、氨氮和总氮的平均去除率分别为86.98%、98.24%、75.54%和71.05%;2[#]装置的分别为91.45%、99.35%、79.04%和65.65%。结果表明,填料中添加煤渣可提高SWIS的水力负荷及污染物去除效果,添加生物基质可为系统反硝化阶段提供碳源,从而提高地下渗滤系统的总氮去除效果,但本生物基质系统不适宜在20 cm/d的高水力负荷下运行。

关键词:地下渗滤系统;煤渣;生物基质;污水处理效果

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2017)05-0150-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2017.05.035

Study on enhanced nitrogen removal of cinder and bio-substrate subsurface wastewater infiltration system

YAN Qun^{1*}, ZHANG Yue², WANG Hong¹, LU Yan-qiu¹

(1. School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology,

Ganzhou 341000, China; 2. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of

Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: In order to enhance the nitrogen removal effect of subsurface wastewater infiltration system(SWIS), two SWISs are built, in which 1[#] system is filled with layers of soil and bio-substrate, 2[#] system is filled with layers of soil and cinder. The influences of cinder and bio-substrate respectively on wastewater treatment effects of SWIS are compared and analyzed. After the two system run steadily at hydraulic loading of 20 cm/d, the average removal rates of COD, TP, NH₄⁺-N and TN are 86.98%, 98.24%, 75.54% and 71.05% respectively by 1[#] system, and the average removal rates of COD, TP, NH₄⁺-N and TN are 91.45%, 99.35%, 79.04% and 65.65% respectively by 2[#] system. The results reveal that adding cinder in fillings can help SWIS to improve the hydraulic load and the removal effects of contamination, while adding bio-substrate can provide carbon for denitrification in the system, then the removal efficiency of TN by SWIS can be improved. But this bio-substrate system is not suitable to operate under the high hydraulic load of 20 cm/d.

Key words: SWIS; cinder; bio-substrate; effect of sewage treatment

地下渗滤系统(SWIS)是一种人工强化污水生态处理技术,具有投资少、运行管理方便、基建成本低等优点^[1]。研究表明,填料中添加孔隙度、渗透系数较高的煤渣可改善SWIS的渗透性能及复氧性能,进而提高系统水力负荷及污水处理效果。严群^[2]采用土壤草炭煤渣全混合装填地下渗滤系统,在水力负荷为10 cm/d时,对COD、总磷和氨氮的平均去除率分别为74.5%、76.8%和98.3%,而土壤草炭混合装填地下渗滤系统仅为69.6%、89.5%

和96.3%。罗仙平等^[3]构建了红壤与煤渣分层装填的地下渗滤,在10 cm/d水力负荷条件下,系统对COD、总磷和氨氮去除率分别达到了94.9%、98.3%和89.0%。也有研究发现,填料中添加活性污泥、腐熟牛粪等有机质、微生物含量丰富的基质可提高系统COD去除率,也可作为生物反硝化脱氮的固体碳源,提高系统的总氮去除效果。Li等^[4]探究了65%草甸棕壤+30%煤渣+5%脱水污泥填料分层装填的SWIS对污水处理效果,结果表明,系统在

收稿日期:2016-10-20

基金项目:江西省科技厅自然科学基金资助项目(20122BAB203027);“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAC11B07);国家科技惠民计划项目(2013GS360203)

作者简介:严群(1973-),女,博士,副教授,主要从事污水渗滤处理技术及水污染控制,通讯联系人,yanqun8219893@163.com。

12.5 cm/d 运行时,对氨氮和总氮的平均去除率分别达到了 90.0% 和 78.6%。张思等^[5]采用 5% 腐熟牛粪与 70% 土壤混合再与 25% 粉煤灰分层装填地下渗滤系统,在 10 cm/d 运行时,对 COD、总磷、氨氮和总氮平均去除率分别为 85.8%、98.1%、93.7% 和 78.4%。李英华等^[6]将活性污泥、炉渣和草甸棕壤按体积比 1:8:11 配成生物基质作为地下渗滤系统的填料,提高了系统渗透性能,并且增加了系统的有机质含量与脱氮微生物量,氨氮和总氮的去除率比草甸棕壤 SWIS 分别提高了 15.7% 和 12.0%。

综上所述,添加煤渣及含有煤渣的生物基质的地下渗滤系统可有效提高系统的水力负荷及污水处理效果。因此,本实验构建了以土壤与煤渣分层装填的 1[#]及土壤与生物基质分层装填的 2[#] 2 套 SWIS 装置,比较了 2 装置在 20 cm/d 时的污水处理效果。

1 实验概况

1.1 实验装置

构建了 2 套直径 20 cm、高 100 cm 的有机玻璃柱为试验装置,分别记为 1[#] 和 2[#],2 装置结构见表 1、图 1。

表 1 SWIS 装置结构

序号	直径/ cm	高度/ cm	填料高度/ cm	填料装填方式
1 [#]	20	100	95	5 cm 砂、5 cm 土壤、60 cm 生物基质、20 cm 土壤、5 cm 砂
2 [#]	20	100	95	5 cm 砂、5 cm 土壤、60 cm 煤渣、20 cm 土壤、5 cm 砂

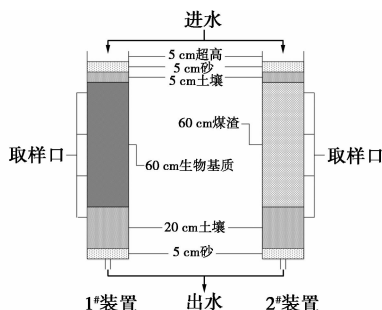


图 1 2 套 SWIS 装置结构示意图

1.2 填料性质

本试验生物基质由体积分数 15% 干化污泥 + 85% 煤渣混合而成,污泥取自赣州市白塔山污水处理厂,煤渣取自华能瑞金电厂,土壤取自江西理工大

校园。各填物理化性质见表 2。

表 2 填物理化性质

项目	有机质质量分数/%	渗透系数/(cm·h ⁻¹)
土壤	0.33	0.83
煤渣	0.90	169.28
生物基质	3.31	73.91

1.3 运行工况及测试方法

2 装置采用连续进水方式,在 20 cm/d 水力负荷下运行。试验原水为自行配制的模拟生活污水。试验每 2 d 采集一次进出水水样测定分析,水质检测项目包括 COD、TP、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 和 TN,均执行《水和废水检测分析方法》(第四版)^[7] 中的检测方法。试验运行工况及进水各污染物平均浓度见表 3。

表 3 试验运行工况及进水水质

运行工况			进水水质/(mg·L ⁻¹)			
水力负荷/ (cm·d ⁻¹)	进水 时间/h	进水流速/ (mL·min ⁻¹)	COD	TP	NH ₄ ⁺ -N	TN
20	24	4.36	385~850	9~17	15~38	18~45

2 结果与分析

2.1 COD、TP 去除效果比较

系统运行稳定后,2 装置对 COD 和 TP 的去除效果显著,去除效果见表 4。由表 3 可知,实验水力负荷较高,进水的 COD 浓度较高、波动较大,在 385~850 mg/L,但 2 装置出水 COD 浓度较稳定,去除率分别为 86.98% 和 91.45%,说明 2 装置在较高水力负荷情况下对 COD 具有较强的抗冲击负荷能力。1[#]装置 COD 出水浓度高于 2[#] 是因为 1[#] 添加了有机质含量丰富的生物基质。

表 4 COD、TP 去除效果

项目	1 [#] 出水/ (mg·L ⁻¹)	2 [#] 出水/ (mg·L ⁻¹)	1 [#] 去除率/ %	2 [#] 去除率/ %
COD	76.70	48.98	86.98	91.45
TP	0.25	0.03	98.24	99.35

根据表 4 可知,2 装置出水总磷浓度低,且较为稳定。相关资料表明^[8],地下渗滤系统对磷的去除主要通过填料的物理吸附及化学吸附沉淀作用,磷是反应性溶质,很容易被土壤胶体吸附或与填料中的 Ca²⁺、Al³⁺、Fe²⁺ 等金属离子反应形成各种难溶

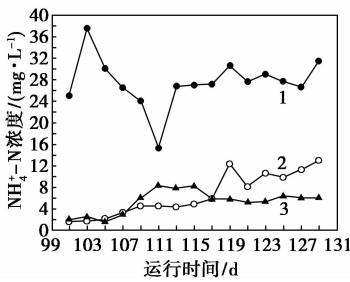
性磷酸盐,从而达到去除磷的目的,因此 SWIS 对磷的去除率通常可达到 90% 以上^[5]。本实验对磷的去除率达到了 98% 以上,这是因为 2 装置填料中均添加了较多的煤渣。有研究发现,煤渣对磷的吸附能力较强,这与煤渣中含有大量的 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{2+} 等离子有关^[9],且煤渣具有多孔结构,孔隙率可达 50% ~ 60%,比表面积较大,并含有残炭^[10],因此煤渣对磷具有较强的物理和化学吸附作用。

2.2 脱氮效果分析

地下渗滤系统中氮的去除机理主要包括填料吸附、生物硝化、反硝化作用及氨氮挥发等。研究表明,碳源是影响生物反硝化作用的主要因素,一般生活污水的 $\text{C}/\text{N} < 3$,碳源不足,反硝化菌活性受到抑制不利于总氮的脱除^[1,11]。为了提高总氮的去除效果,本实验在生物基质中添加了 15% 活性污泥作为系统中反硝化阶段的固体碳源。

2.2.1 氨氮去除效果

2 装置氨氮去除效果见图 2。由图 2 可知,进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度范围在 15 ~ 37 mg/L,1# 装置出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均浓度为 6.36 mg/L,平均去除率为 76.54%;2# 装置出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均浓度为 5.39 mg/L,平均去除率为 79.04%。2 套 SWIS 对氨氮的去除效果较为明显,出水水质均可达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 B 标准。



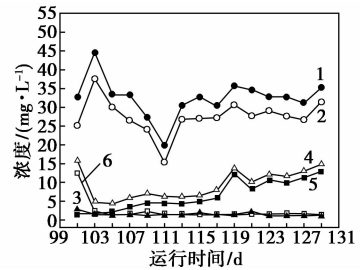
1—进水;2—1# 出水;3—2# 出水

图 2 2 装置氨氮去除效果比较

2# 装置 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果高于 1# 装置,这是由于 2# 装置填料的煤渣较 1# 更多,煤渣具有多孔结构,孔隙率及渗透系数较大,复氧性能良好,使系统内部好氧环境占优势,有利于硝化反应的进行,由表 2 可知生物基质的渗透系数低于煤渣,1# 生物基质系统在运行期间有堵塞现象发生,部分进水从装置侧壁渗漏,填料由不饱和状态变为饱和,孔隙率减小,复氧性能降低, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 出水浓度逐渐增加,并超出排放标准。

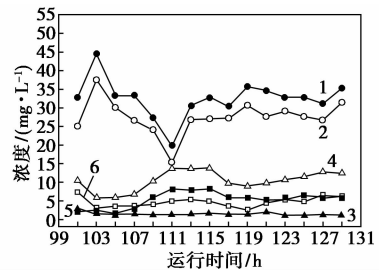
2.2.2 总氮去除效果

在水力负荷为 20 cm/d,进水总氮浓度在 19 ~ 44 mg/L 之间时,1# 装置出水 TN 平均浓度为 9.32 mg/L,平均去除率为 71.05%;2# 装置出水 TN 平均浓度为 10.74 mg/L,平均去除率为 65.65%。2 装置的 TN 出水浓度都较低,1# 装置的 TN 去除率高于 2# 装置。2 装置进水中各氮素浓度分别见图 3、图 4。



1—进水 TN;2—进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$;3—进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$;
4—出水 TN;5—出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$;6—出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$

图 3 1# 进出水氮素浓度



1—进水 TN;2—进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$;3—进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$;
4—出水 TN;5—出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$;6—出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$

图 4 2# 进出水氮素浓度

试验污水中的氮污染物主要由 $(\text{NH}_4)_2 \cdot \text{SO}_4$ 配成,因此进水氮素主要为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 。2 装置出水中以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为主,1#、2# 亚硝态氮 ($\text{NO}_2^- - \text{N}$) 出水浓度分别为 0.06、0.15 mg/L,且较为稳定, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 出水浓度分别为 2.30、4.68 mg/L, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 是硝化阶段的产物,且通过生物反硝化作用转化为气体去除,反硝化菌是异养、兼性厌氧细菌,因此厌氧环境和碳源是其生长的必要条件。

研究表明^[12],随着水力停留时间的增加, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 出水浓度减小,说明连续淹水状况有利于反硝化反应,但水力负荷偏高,长时间淹水会使填料层处于厌氧状态,不利于硝化反应,因此地下渗滤系统水力停留时间不宜过长或过短。与煤渣相比,添加污泥的生物基质渗透系数较低,1# 装置在 20 cm/d 运行时发生堵塞,系统内部出现连续淹水现象,水力

停留时间增加,填料处于饱和状态,孔隙率减小,这为反硝化反应提供了厌氧环境,提高了总氮去除率,但系统堵塞,有效处理水量减小,必然影响系统长期稳定运行,且填料层长期处于厌氧状态不利于硝化反应,由图2可知 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 出水浓度已呈逐渐上升趋势。这说明添加15%活性污泥的生物基质SWIS不适宜在较高的20 cm/d水力负荷下运行。

也有研究表明^[12-14],污水自系统上部进入后,大部分可降解有机物已在0~20 cm的上部区域降解,致使系统下部反硝化缺氧区碳源不足,而添加活性污泥的生物基质经浸泡后可释放大量有机物,为反硝化反应提供了充足碳源,且含污泥的生物基质中含有大量的脱氮微生物,可大大提高系统的硝化反硝化强度^[6]。实验在15 cm/d水力负荷时对装置沿程污水分布进行了测定,2[#]距装置顶部60 cm和80 cm处COD平均浓度分别为107.69 mg/L和83.44 mg/L,去除率已达到了78.75%和76.71%,C/N约为3.03和2.50,可见2[#]装置反硝化阶段缺乏碳源,而添加生物基质的1[#]装置在距装置顶部60 cm和80 cm处COD平均浓度分别为196.15 mg/L和237.43 mg/L,C/N约为5.31和7.73,碳源充足,利于反硝化菌的生长,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和TN浓度较2[#]更低。这与李英华等^[6]研究结果一致。

3 结论

(1)2装置填料中添加了孔隙率大、渗透性及复氧性能较好的煤渣,使地下渗滤系统水力负荷提升到了20 cm/d,同时还保证了较好的出水水质,这远远高于USEPA^[15]建议的0.8~6.6 cm/d的水力负荷。

(2)本试验的2套SWIS装置对COD和TP均具有显著的污水净化效果。添加生物基质会使系统出水COD浓度增加,生物基质的1[#]装置COD出水浓度为76.70 mg/L,高于2[#]的48.98 mg/L;煤渣对磷具有较强的物理和化学吸附作用,2装置填料中均含有较多煤渣,TP去除率达到了98%以上。TN的出水浓度基本低于15 mg/L,达标率100%。

(3)实验结果表明,填料中添加生物基质可为系统反硝化阶段提供碳源,促进反硝化反应,提高地

下渗滤系统的总氮去除率;但生物基质渗透系数较煤渣低,在高达20 cm/d的水力负荷下运行时发生了堵塞现象, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效果逐渐下降且超出排放标准(GB 18918—2002),因此,分析认为添加15%活性污泥的生物基质系统不适宜在20 cm/d的高水力负荷下运行。

参考文献

- [1] 张建,部长飞,刘志强,等. 地下渗滤系统的中间分流强化脱氮研究[J]. 中国给水排水,2004,20(4):1-4.
- [2] 严群. 分层填料土地毛管渗滤系统净化生活污水及其机理研究[D]. 上海:同济大学,2011:151-152.
- [3] 罗仙平,赖兰平,封丹,等. 分层填料土地渗滤系统处理生活污水[J]. 土木建筑与环境工程,2009,31(6):132-136.
- [4] Li Y H, Li H B, Wang H, et al. Comparison of the treatment performance of bio-substrate based and meadow brown soil based subsurface infiltration systems for domestic wastewater treatment[J]. Water Science & Technology, 2013, 63(7):506-513.
- [5] 张思,宁国辉,杨峥峥,等. 复合填料土壤渗滤系统处理农村生活污水的效果[J]. 环境工程学报,2014,8(11):4625-4630.
- [6] 李英华,李海波,徐新阳,等. 地下渗滤系统强化生活污水脱氮的生物基质研究[J]. 内蒙古师范大学学报:自然科学汉文版,2015,44(5):728-733.
- [7] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境出版社,2002.
- [8] 张建,黄霞,魏杰,等. 地下渗滤污水处理系统的氮磷去除机理[J]. 中国环境科学,2002,22(5):438-441.
- [9] 姜应和,柳君侠. 粉煤灰碎砖颗粒除磷实验研究[J]. 环境工程学报,2011,5(7):1532-1537.
- [10] 刘精今,李小明,杨麒. 煤渣吸附性能及在废水处理中的应用[J]. 工业用水与废水,2003,34(1):12-15.
- [11] 张建,黄霞,刘超翔,等. 地下渗滤处理村镇生活污水的中试[J]. 环境科学,2002,23(6):57-61.
- [12] 李海波,李英华,孙铁珩,等. 污水地下渗滤系统脱氮效果及动力学过程[J]. 生态学报,2011,31(24):7351-7356.
- [13] And F S, Home A J. Enhanced nitrate removal efficiency in wetland microcosms using an episediment layer for denitrification[J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(6):1231-1237.
- [14] Cuyk S V, Siegrist R, Logan A, et al. Hydraulic and purification behaviors and their interactions during wastewater treatment in soil infiltration systems[J]. Water Research, 2001, 35(4):953-964.
- [15] USEPA. Onsite wastewater treatment systems manual[M]. Washington:USEPA, 2002. ■