

分层填料地下渗滤系统生活污水处理研究

汪宏¹, 严群^{1*}, 张越¹, 罗仙平^{1,2}, 杨健³

(1. 江西理工大学建筑与测绘工程学院, 江西赣州 341000;

2. 江西省矿冶环境污染控制重点实验室, 江西赣州 341000;

3. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要:建立了以土壤煤渣分层装填的1[#]和以土壤河砂分层装填的2[#]地下渗滤装置,考察2装置在不同水力负荷下的生活污水处理效果。结果表明,在5、10 cm/d运行时,2装置均有良好的处理效果,而1[#]装置处理效果略高于2[#]装置,其中2[#]装置在10 cm/d时的COD、总磷、氨氮、总氮的平均出水浓度分别为33.8、0.86、0.56、32.1 mg/L;在20 cm/d时,1[#]装置COD、总磷、氨氮、总氮的平均出水浓度分别21.5、0.76、9.68、18.47 mg/L,2[#]装置的分别为35.5、2.11、0.51、24.92 mg/L,1[#]装置对总氮、总磷的平均去除率分别比2[#]装置的高26.78%、27.69%。分层装填能综合利用土壤层的低渗透性和煤渣(河砂)层的高渗透性,在提高系统运行水力负荷的同时保持了对污染物去除的高效性;土壤-煤渣分层装填的1[#]装置污水处理效果更显著。

关键词:地下渗滤系统;污水处理;煤渣;河砂

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)08-0158-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.08.038

Treatment of domestic wastewater by layered-filling subsurface infiltration system

WANG Hong¹, YAN Qun^{1*}, ZHANG Yue¹, LUO Xian-ping^{1,2}, YANG Jian³

(1. School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Environment Pollution Control of Mining and Metallurgy, Ganzhou 341000, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Two apparatuses are established with two different fillers, i. e. Apparatus I loaded with soil and cinder and Apparatus II loaded with soil and sand in delamination, respectively. COD, TP, NH₄⁺-N and TN removal effects of two apparatus are inspected at different hydraulic load. The result show that at the load of 5 cm/d and 10 cm/d, the performance in Apparatus I is slightly higher than that of Apparatus II. The average concentrations of COD, TP, NH₄⁺-N, TN in the effluent in Apparatus II are 33.8 mg/L, 0.86 mg/L, 0.56 mg/L and 32.1 mg/L, respectively, at the load of 10 cm/d. At 20 cm/d, the average concentrations of COD, TP, NH₄⁺-N, TN in the effluent are 21.5 mg/L, 0.76 mg/L, 9.68 mg/L and 18.47 mg/L in Apparatus I, respectively, and 35.5 mg/L, 2.11 mg/L, 0.51 mg/L and 24.92 mg/L in Apparatus II, respectively. In comparison with Apparatus II, the removal effect of TN and TP in Apparatus I is increased by 26.78% and 27.69%, respectively. Layered-filling can make good use of the low hydraulic conductivity in soil and the high hydraulic conductivity in soil(sand). The removal of pollutants and hydraulic conductivity of wastewater infiltration system can also be effectively improved. In conclusion, the filtration performance is much better of Apparatus I.

Key words: subsurface infiltration system; domestic wastewater; cinder; sand

地下渗滤系统是一种自然净化与人工工艺相结合的污水就地处理技术,具有处理效果好、投资少、运行管理方便及处理水可回用等特点,对收集和设施不完善的农村生活污水有显著的处理效果,于近年来逐步成为国内外的研究热点^[1-4]。

目前对地下渗滤系统的研究主要集中在改良填料方面。张建等^[5-6]发现,在土壤中添加10%的草炭并分层装填,不仅使系统的水力负荷从2 cm/d提高到4 cm/d,并对氨氮(NH₄⁺-N)和总氮(TN)的去除率分别提高了12%和11%。张思等^[7]研究了70%土壤+5%腐熟牛粪+25%粉煤灰填料地下渗

滤系统的生活污水处理效果,研究发现,在10 cm/d时系统对COD、总磷(TP)、NH₄⁺-N和TN平均去除率分别为85.8%、98.1%、78.4%和93.7%。Li等^[8]考察了65%草甸棕壤+30%煤渣+5%脱水污泥填料系统的处理效果,实验表明,在12.5 cm/d运行时,系统对NH₄⁺-N及TN的平均去除率分别为90%、78.6%。

综上所述,对填料的改良可提高系统运行水力负荷,改善系统污水处理效果。为进一步提高渗滤系统的水力渗透性能及污染物去除效果,本实验建立了以土壤-煤渣分层的1[#]及土壤-河砂分层装填

收稿日期:2016-03-22

基金项目:江西省自然科学基金项目(201222BAB203027);“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAC11B07);江西省研究生创新基金(YC2015-S286)

作者简介:汪宏(1990-),男,硕士,主要从事污水渗滤处理技术及水污染控制;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。

的2# 2套地下渗滤装置,分别探究2装置在不同水力负荷下的污水处理效果,考察分层填料对系统水力渗透性能及污水处理效果的影响,以期在实际工程应用提供理论依据。

1 试验概况

1.1 实验装置

生活污水先经调节池均衡水量和水质后,由蠕动泵输送至配水槽,通过自流及毛细管作用进入渗滤装置中。1#、2#装置及装填结构见图1,装置尺寸构造及填料装填方式见表1。

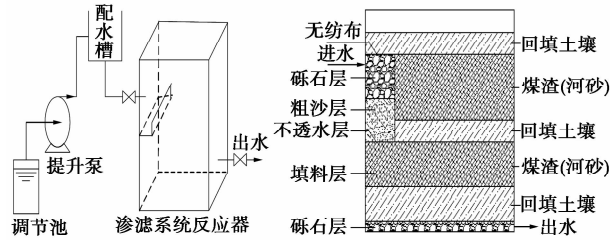


图1 实验装置及装填结构示意图

表1 装置尺寸及填料装填方式

装置	长×宽×高/m	填料厚/m	装填方式
1#	1.0×0.15×1.0	0.90	土壤与煤渣分层装填,由上至下依次为10 cm土壤、30 cm煤渣、10 cm土壤、20 cm煤渣、20 cm土壤
2#	1.0×0.15×1.0	0.90	土壤与河砂分层装填,由上至下依次为10 cm土壤、30 cm河砂、10 cm土壤、20 cm河砂、20 cm土壤

1.2 填料性质研究

装置运行前,对装置中填料的物理性质进行分析,分析结果见表2。

表2 3种填料物理性质分析

填料	含水量/ %	渗透系数/ (cm·h ⁻¹)	氨吸附量/ (mg·g ⁻¹)	磷吸附量/ (mg·g ⁻¹)
土壤	4.5	0.147	1.223	0.536
煤渣	22	468.0	0.526	1.936
河砂	15	212.4	0.631	0.161

从表2可知,3种填料中,以煤渣的持水性能、渗透性能和磷吸附性能最好,氨氮吸附量大小为土壤>河砂>煤渣。

1.3 测试项目及分析方法

水质检测项目包括COD、TN、NH₄⁺-N、硝态氮

(NO₃⁻-N)、亚硝态氮(NO₂⁻-N)和TP,均采用国家标准方法测定^[9]。

1.4 运行工况

装置从5 cm/d开始运行,运行稳定后,将水力负荷逐步增加到20 cm/d。按照不同的填料组合、水力负荷、进水方式、进水频率、进水时间,设计了6组不同的运行工况,详见表3。

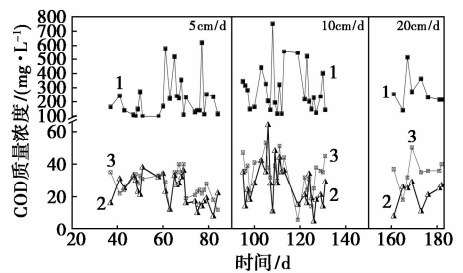
表3 试验工况

装置	水力负荷/ (cm·d ⁻¹)	进水频率/ (次·d ⁻¹)	进水时间/ (min·次 ⁻¹)	进水速度/ (mL·min ⁻¹)
1#	5	4	45	42
2#		4	45	42
1#	10	8	45	42
2#		8	45	42
1#	20	8	45	84
2#		8	45	84

2 结果与讨论

2.1 COD去除效果的比较

污水进入地下渗滤系统时,易降解有机物首先在微生物作用下被分解为可溶性有机物,可溶性有机物进入填料包气带后,被逐步降解为小分子有机物,为系统中微生物的生长提供了必需的能源和营养,保证了系统中微生物的正常生长。不同水力负荷下,2装置COD去除效果见图2。



1—进水;2—1#出水;3—2#出水

图2 2装置不同水力负荷下的COD去除效果

由图2可知,在5、10、20 cm/d运行时,1#装置的COD平均去除率分别为89.4%、90.7%、92.2%,平均出水浓度分别为23.5、27.3、21.5 mg/L;2#装置的COD平均去除率分别为87.5%、88.4%、87.1%,平均出水浓度分别为27.8、33.8、35.5 mg/L。

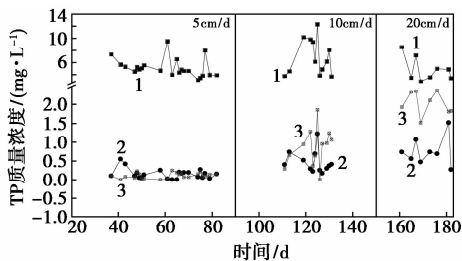
2装置对有机物均有较高的降解水平,抗有机负荷冲击能力强。但不同装置的有机物去除效果有一定的差异,1#装置在各水力负荷下的COD去除效果均略高于2#装置,分析原因为:①煤渣填料比表

面积大,具有多孔结构,孔隙率高达 50% ~ 60%^[10],且不规则孔隙较多,污水流经煤渣层,可使填料内保持较适当的固、液、气三相比,有利于微生物生长^[11],进水水力负荷的增加,为微生物的生长提供了必要的营养物质,污水得以净化的同时,微生物得以生长;②河砂表面光滑、质地密实、持水性能差,污水在河砂间隙内渗流,与煤渣内孔隙相比,河砂间隙对有机物的截留与吸附能力低,因而对污水有机物的去除效果更低。

总体而言,2 装置对有机物均有显著的去除效果,出水 COD 平均浓度均能达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 A 标准。

2.2 TP 去除效果的比较

不同水力负荷下,2 装置 TP 去除效果见图 3。



1—进水;2—1#出水;3—2#出水

图 3 2 装置不同水力负荷下的总磷去除效果

由图 3 可知,在 5、10、20 cm/d 运行时,1#装置的 TP 平均去除率分别为 97.05%、92.57%、84.42%,平均出水质量浓度分别为 0.15、0.47、0.76 mg/L;2#装置的 TP 平均去除率分别为 97.86%、87.18%、56.73%,平均出水质量浓度分别为 0.11、0.86、2.11 mg/L。

地下渗滤系统主要是通过填料吸附完成对污水中磷的去除。在 5、10 cm/d 运行时,2 装置对 TP 去除效果显著;在 20 cm/d 运行时,2 装置 TP 平均去除率均降低,且 2#装置降幅更大。水力负荷的增大,使得:①污水与填料接触的时间变短,水中部分磷来不及与填料中游离态的 Fe、Al 等离子发生反应;②系统中溶解氧浓度降低,逐渐出现厌氧环境,好氧微生物活性降低,大量 Fe³⁺ 被还原成 Fe²⁺ 后,Fe(PO₄)₃ 等被分解,磷又以离子态存在于土壤及污水中,因此,2#装置除磷效果下降^[12-13]。

2 装置除磷效果的差异源于填料对磷的最大吸附量不同,由表 2 可知,煤渣对磷最大吸附量为 1.936 mg/g,远远高于河砂的 0.161 mg/g,且煤渣中含有大量的 Fe、Al、Ca 等元素,易与被吸附的磷发生沉淀反应^[14];河砂的主要成分是 Si 及其氧化物,而

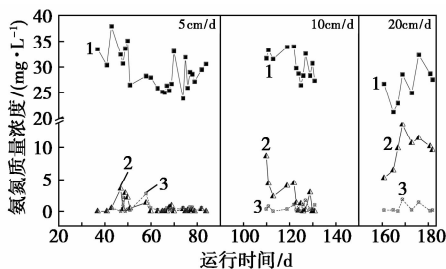
Ca 和 Fe 含量较低^[15]。

2.3 氮的去除效果比较

地下渗滤系统脱氮过程主要是通过氨化作用、硝化作用及反硝作用等生物反应完成。间歇进水的运行方式可使系统中同时存在好氧和厌氧环境,为生物脱氮提供良好的条件。

2.3.1 NH₄⁺-N 的去除效果比较

进水中的有机氮在好氧条件下被氨化细菌分解为 NH₄⁺-N,由于土壤胶体带负电,NH₄⁺-N 极易被填料吸附,好氧条件下,硝化菌将填料吸附的 NH₄⁺-N 氧化为硝态氮(NO_x⁻-N),恢复了部分填料的 NH₄⁺-N 吸附能力。不同水力负荷下,2 装置的 NH₄⁺-N 去除效果见图 4。



1—进水;2—1#出水;3—2#出水

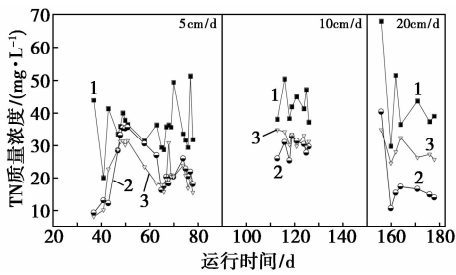
图 4 2 装置不同水力负荷下的氨氮去除效果

由图 4 可知,在 5、10、20 cm/d 运行时,1#装置的 NH₄⁺-N 平均去除率分别为 98.04%、92.49%、61.90%,平均出水浓度分别为 0.56、2.29、9.68 mg/L;2#装置的 NH₄⁺-N 平均去除率分别为 98.49%、98.18%、97.98%,平均出水浓度分别为 0.43、0.56、0.51 mg/L。

在 5、10 cm/d 时,2 装置对 NH₄⁺-N 的去除效果且平均去除率相差不大;在 20 cm/d 时,1#装置的 NH₄⁺-N 去除率下降到 61.90%,但 2#装置的 NH₄⁺-N 平均去除率仍可达到 97.98%,受水力负荷影响较小,分析原因为:①河砂对氨的吸附量为 0.631 mg/g,高于煤渣的 0.526 mg/g,且河砂表面光滑,水力负荷增加并未使该系统的水力渗透性能降低,系统内保持了良好的好氧硝化环境;②随进水水力负荷的增加,煤渣的多孔结构使得系统水力渗透性降低且污水在孔隙内滞留时间延长,形成了较多不利于硝化反应的厌氧微环境^[16]。因而,在 20 cm/d 时,2#装置对 NH₄⁺-N 去除效果更好。

2.3.2 TN 的去除效果比较

不同水力负荷下,2 装置 TN 去除效果见图 5,出水中氮素占 TN 百分比见表 4。



1—进水;2—1#出水;3—2#出水

图5 2装置在不同水力负荷时总氮去除效果

表4 2装置在不同水力负荷时出水氮素占TN百分比

装置	水力负荷/ ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)	氨氮/ %	硝态氮/ %	亚硝态氮/ %	有机氮/ %
1#	5	2.83	71.96	21.13	4.08
	10	4.70	83.64	3.32	8.97
	20	50.80	29.89	3.79	15.52
2#	5	2.11	91.28	1.01	5.60
	10	2.40	89.81	1.00	6.79
	20	1.77	79.30	0.20	18.73

由图5可知,在5、10、20 cm/d 运行时,1#装置的TN平均去除率分别为46.61%、29.62%、57.76%,平均出水浓度分别为19.84、29.62、18.47 mg/L ;2#装置的TN平均去除率分别为45.70%、24.41%、30.98%,平均出水浓度分别为20.17、32.10、24.92 mg/L 。

由表4可知,在5、10 cm/d 运行时,1#装置出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 占出水TN的70%以上,2#装置出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 占出水TN的90%以上,表明2装置中溶解氧充足,系统以氧化环境为主,反硝化菌活性受抑制,对TN去除效果欠佳;在20 cm/d 运行时,1#装置 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均出水浓度为5.52 mg/L ,占出水TN的29.89%,2#装置 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均出水浓度为19.76 mg/L ,占出水TN的79.3%。2装置 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均出水浓度下降,表明进水水力负荷的增加使系统溶解氧浓度降低,厌氧区域增大,反硝化菌活性增强,2装置对TN的平均去除率增加,但2#装置由于填料复氧性能更强,对TN的平均去除率更低。

硝化、反硝化脱氮是地下渗滤系统去除TN的主要途径。有研究表明,系统中溶解氧浓度和污水中碳氮比(C/N)是影响反硝化脱氮的主要因素^[17]。水力负荷增加,填料的复氧能力降低,系统逐渐出现厌氧环境,反硝化菌活性增强。此外,在系统运行过程中,污水中大于85%的可降解有机物在系统0~20 cm的区域内被降解,污水进入缺氧区后碳源不足^[18-19],抑制了反硝化过程,也不利于系统对TN

的去除。从2装置的填料装填结构分析,填料的分层装填,在垂直方向上可利用煤渣(河砂)层高渗透性的特点,提高系统运行水力负荷,同时又利用土壤层低渗透性来保证系统的布水均匀性,从而提高系统的水力负荷,另外,土壤层和煤渣层均有利于形成局部的好氧-厌氧交替环境,而河砂层均以好氧环境为主。

综上所述,2装置在各水力负荷下均有较好的污水处理效果;填料的分层装填,可有效提高系统的水力渗透性能,同时又改善系统的氧化还原环境,综合利用填料的理化性质,提高系统的污水处理效果。其中,以土壤-煤渣分层装填的1#装置污水处理效果更显著。

3 结论

(1)在水力负荷为5、10 cm/d 时,2装置对污水中COD、TP和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 有显著的去除效果,其平均出水浓度均能达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级A标准。在20 cm/d 时,1#装置对COD、TP、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN的平均去除率分别为92.2%、84.42%、61.90%、57.76%,平均出水浓度分别为21.5、0.76、9.68、18.47 mg/L ;2#装置的分别为87.10%、56.73%、97.98%、30.98%,平均出水浓度分别为35.5、2.11、0.51、24.92 mg/L 。

(2)土壤与煤渣(河砂)的分层装填可提高系统的布水均匀性,在垂直方向上可综合利用不同填料的物理化学性能,提高水力渗透性能,改善系统的氧化还原环境,其中,土壤层和煤渣层均有利于形成好氧-厌氧环境,1#装置脱氮效果优于2#装置。

(3)与USEPA推荐的土壤填料渗滤系统最高水力负荷(6.6 cm/d)相比,2种分层装填填料均能在20 cm/d 下正常运行,提高了系统的水力负荷,减少占地面积,且保持了高效的污染物去除能力,其中1#装置的综合性能优于2#装置,本实验可为实际工程提供理论支撑。

参考文献

- [1] 田宁宁,杨丽萍,彭应登.土壤毛管渗滤处理生活污水[J].中国给水排水,2000,16(5):12-15.
- [2] 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.
- [3] Magesan G N, Williamson J C, Sparling G P, et al. Hydraulic conductivity in soil irrigated with wastewater of differing strengths: Field and laboratory studies[J]. Aust J Soil Research, 1999, 37: 391-402.

2 结果与讨论

2.1 Ni²⁺ 标准曲线

如图1所示,分别测定 Ni²⁺ 含量在 10、20、30、40、50 mg/L 时的吸光度,由紫外测得其线性曲线。曲线方程 $y = 0.00913x + 0.02019$, 线性相关系数 $R^2 = 0.99930$ 。

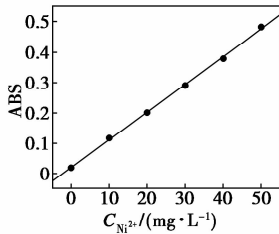


图1 Ni²⁺ 标准曲线

2.2 废液中 Ni²⁺ 含量的测定结果

由表2数据可得,0.05 mol/L 的 EDTANa₂ 的平均消耗量为 16.666 mL, 计算出原料废液中 Ni²⁺ 含量为 97.8 g/L。

表2 EDTANa₂ 耗量

样品序号	滴定起点刻度	滴定终点刻度	EDTANa ₂ 耗量/mL
样品1	1.14	17.83	16.69
样品2	0.20	16.79	16.59
样品3	0.23	17.00	16.77
样品4	0.32	16.99	16.67
样品5	0.50	17.11	16.61

2.3 沉淀的最佳 NaOH 用量及其 Fe³⁺ 含量的变化

图2、图3显示沉淀的最佳 NaOH 用量及其 Fe³⁺ 含量的变化。由图4可知,当 NaOH 用量逐渐增加时,镍离子含量逐渐减小,当 NaOH 用量达到 41 mL 以后,渗透液中镍离子含量保持不变。为尽量减少 NaOH 的用量,得出最佳的 NaOH 用量为 41 mL。此时的 pH 为 9.56。同时在 NaOH 的滴加过程中,Fe³⁺ 含量几乎保持不变。这表明渗透液中

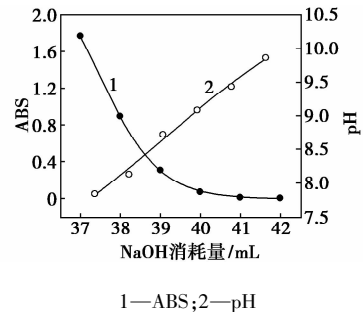


图2 NaOH 消耗量对镍离子沉淀效果的影响

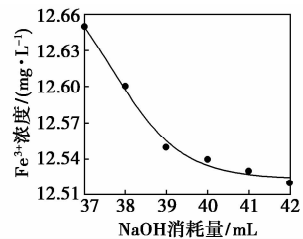


图3 沉淀镍离子过程中渗透液中
铁离子含量的变化

(上接第161页)

- [4] Kruzic A P. Natural treatment and on-site processes[J]. Water Environment Research,1997,69(4):52-56.
- [5] 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.
- [6] 张建,黄霞,施汉昌,等. 掺加草炭的地下渗滤系统处理生活污水[J]. 中国给水排水,2004,20(6):41-43.
- [7] 张思,宁国辉,杨铮铮,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.
- [8] 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.
- [9] 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,2002:210-281.
- [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] 严群,吴一繁,杨健,等. 复合填料地下渗滤系统的强化脱氮研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2010,38(5):697-703.
- [12] Sakadevan K, Koshigoe H J. Phosphate adsorption characteristics of

soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland system[J]. Water Research,1998,32(2):393-399.

- [13] Scholz M. Wetland systems to control urban runoff[M]. Amsterdam: Elsevier,2006.
- [14] Zhang J, Huang X, Liu C, et al. Nitrogen removal enhanced by intermittent operation in a subsurface wastewater infiltration system[J]. Ecology Engineer,2005,25(4):419-428.
- [15] 袁东海,景丽洁,高士祥,等. 几种人工湿地基质净化磷素污染性能的分析[J]. 环境科学,2005,26(1):51-55.
- [16] 关小满,张笑一,彭润芝. 污水土地生态处理脱氮技术的中型试验研究[J]. 生态学报,2005,25(4):854-860.
- [17] 王振,刘超翔,董建,等. 分流比对土壤渗滤系统脱氮效果的影响研究[J]. 环境科学学报,2013,33(7):1926-1931.
- [18] Fleming-Singer M S, Horne A J. Enhanced nitrate removal efficiency in wetland microcosms using an episediment layer for denitrification[J]. Environmental Science and Technology,2002,36(6):1231-1237.
- [19] van Cuyk S, Siegrist R, Logan A, et al. Hydraulic and purification behaviors and their interaction during wastewater treatment in soil infiltration systems[J]. Water Research,2001,35(4):953-964. ■