

2 种不同模块化填料组合的多级土壤渗滤系统的比较

魏才捷¹, 朱擎², 吴为中^{1*}, 李超¹, 高航¹

(1. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; 2. 中国环境监测总站, 北京 100012)

摘要:以滇池入湖河流污水为对象, 研究了 2 种不同模块化填料组合的多级土壤渗滤系统在不同运行条件下的处理效果差异。结果表明, 各系统都具有较好的 COD 去除效果, 平均去除率均在 50% 以上。沸石-陶结系统无论曝气与否, 均具有高 NH_4^+ -N 去除能力, 出水浓度 $< 1 \text{ mg/L}$ 。陶粒-红壤 MSL 系统在 8:1 的气水比下, 具有良好的氨氮去除能力, 平均去除率为 84%; 在非曝气条件下氨氮去除能力相对低一些, 在 40% 以下。非曝气沸石-陶结系统 TN 去除效果最好, 平均去除率在 68% 以上, 最高达到 98%。其他 3 个系统在不同工况下 TN 去除效果差别较大。4 个系统 TP 平均去除率在 30% ~ 90% 之间, 不同工况下去除效果不同。高污染负荷下, 沸石-陶结系统(M1、M2)的磷去除能力较强, 稳定状态下平均去除率均在 80% 以上。通过分析系统沿程氮转化效率, 探讨了各系统的氮去除机制。

关键词:多级土壤渗滤系统; 沸石; 陶粒; 红壤; 脱氮

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)06-1860-07

Comparison of Two Types of Multi-soil-layering Treatment System Filled Different Paddings

WEI Cai-jie¹, ZHU Qing², WU Wei-zhong¹, LI Chao¹, GAO Hang¹

(1. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 2. China National Environmental Monitoring Center, Beijing 100012, China)

Abstract: Two types of multi-soil-layering (MSL) systems, each of them was filled with different padding, including both the layers of mixture layers (ML) and permeable layers (PL), which designed for purifying polluted river water and for studying the difference of the pollutant removal efficiency between them under different operation conditions. The results indicated that the four systems all had great COD removal efficiency and the removal rate of each of them was above 50%. Zeolite-lightweight ceramic pellet system (Z-LCPS) has high removal efficiency of NH_4^+ -N, and the concentration of the final outflow is below 1 mg/L. When the air and water ratio is 8:1, ceramisite-red clay system (C-RCS) has high NH_4^+ -N removal rate which is up to 84%. However, the NH_4^+ -N removal rate of C-RCS is below 40% under the un-aerated condition. The Z-LCPS under un-aerated condition has the best TN removal efficiency that the average removal rate of TN is above 68% and reaches the 98% at best. Under the high pollutant loading, the TP removal efficiency of Z-LCPS (M1, M2) is better than C-RCS, and under the stable period, the TP removal rate is above 80%. At last, the difference of the nitrogen removal mechanism between the four systems is analyzed through the changes of nitrogen concentration along the flow direction.

Key words: multi-soil-layering treatment (MSL); zeolite; ceramisite; red clay; nitrogen removal efficiency

土地处理系统自 20 世纪 70 年代开始, 就得到国内外的广泛关注, 并在工艺设计与运行参数等方面进行了大量研究与实际应用。但传统的土壤渗滤工艺存在结构单一、脱氮效果差、土壤孔隙易堵塞、处理负荷低等缺陷。多级土壤渗滤系统 MSL (multi-soil-layering treatment) 是日本在 20 世纪 90 年代首次提出, 并围绕土壤模块化的理念将土壤渗滤系统分为混合模块层 (mixture Layers, ML)、渗滤层 (permeable layers, PL), 整体结构呈砖块垒砌模式, 其内能形成多个好氧、厌氧环境促进污染物去除^[1]。该系统在稳定的水力负荷条件下, 进水通过毛细管作用能均匀渗滤到系统的 PL 层及 ML 层, 并明显改进了传统土地处理系统的堵塞问题。

MSL 系统具有投资少、运行费用低、处理水量负

荷高、脱氮除磷效果好等优点, 并可以充分利用当地资源添加到混合模块层来增加系统除磷、反硝化及对特定污染物的去除效果^[2~4]。Luanmanee 等^[3]提出 MSL 系统可通过适量曝气来提高 COD、TN、TP 的去除率, 但过量曝气会造成出水硝氮浓度过高, 降低 TN 去除率。Boonsook 等^[4]研究了采用不同渗滤层 (PL) 材料对 MSL 处理效率的影响。Sato 等^[5]、Masunaga 等^[6]、Chen 等^[7]分别研究了 MSL 系统采用不同水力负荷、不同模块大小对污染物去除的影响并初步探讨了 MSL 系统内污染物沿程去除机制。

收稿日期: 2008-07-28; 修订日期: 2008-11-27

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2005AA601010-03); 国家重大水专项项目 (2008ZX07102-003)

作者简介: 魏才捷 (1984~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制与环境生物技术, E-mail: weicaijie2002@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wuweizhong@pku.edu.cn

MSL 系统工艺上的革新、模块化填料的开发是进一步强化提高该系统的净化效率的关键点. 本试验从工艺设计上首次采用具有曝气段、缺氧段的 2 级 MSL 系统, 并结合当地资源选择了 2 种模块化的填料组合, 开展针对受污染河水的净化实验研究, 以期为新型 MSL 系统的工程应用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验装置与工艺流程

本试验模拟 MSL 系统装置如图 1 所示, 一共有 4 套系统, 分别为 MSL1、MSL2、MSL3、MSL4 (简称 M1、M2、M3、M4), 每套系统包含 2 个模拟段. 其中 M1 和 M2 内填料相同, M3 和 M4 内填料相同; M1 和 M3 的第 1 段为曝气段, 采用分别置于承托层上部四角的微孔曝气头曝气. 受污染河水经给水箱初沉后, 由计量泵配水依次流经第 1 段以及第 2 段的渗滤模块净化层, 再通过上流式出水管 (维持第 2 段渗滤层的淹水水位) 流出系统.

渗滤模块净化层总高 1.2 m, 填料的具体配比

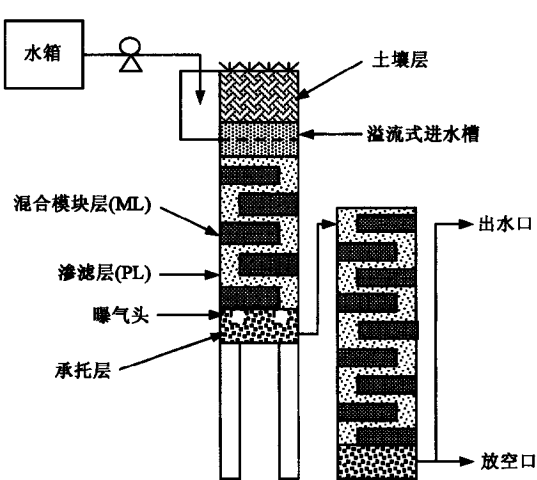


图 1 MSL 系统中试模拟实验装置剖面
Fig. 1 Profile structure of experiment MSL system

见表 1. M1、M2 的 PL 层采用沸石 (zeolote), ML 层中主要是陶结 (lightweight ceramic pellet); M3、M4 的 PL 层采用陶粒 (ceramisite), ML 层中主要是红壤 (red clay). 其中 ML 层每个模块的规格为 0.295 m × 0.215 m × 0.075 m.

表 1 MSL 系统填料组合

Table 1 Compositions and ratios of the materials filled in MSL system		
填料层	M1 和 M2	M3 和 M4
ML	陶结 (50%)、木炭 (35%)、 石灰石 (10%)、铁屑 (5%)	土壤 (30%)、陶砂 (30%)、水洗钢渣 (20%)、 竹炭 (10%)、火山石 (10%)、石灰石 (10%)
PL	沸石	陶粒

1.2 运行条件及进水水质

本中试规模的模拟 MSL 系统一共稳定运行了 100 d. 进水采用昆明市区流向滇池的入湖支流大清河河水, 大清河上游段为生活污水, 下游段设有截污闸, 在雨季期间会根据水位上升情况开闸泻洪, 本试验区取水点在截污闸下游, 因此水质波动较大, 上游

开闸时为生活污水, 闭闸时为回灌滇池湖水. 根据水质情况及系统运行工况将 100 d 分为 5 个阶段, 分别对每个阶段 4 个系统处理效果进行对比分析. 5 个阶段的进水水质与运行工况列于表 2, 其中第 2、4、5 阶段进水主要为高浓度生活污水, 第 1、3 阶段主要为回灌滇池湖水, 污染物浓度较低.

表 2 各阶段运行工况及进水水质范围

Table 2 Operating conditions and range of experiment MSL system influent in each period									
运行阶段	运行时间 /d	HLR /m ³ ·(m ² ·d) ⁻¹	进气量 ¹⁾ /L·h ⁻¹	气水比 ¹⁾	水温 /℃	COD /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹
1	1~25	1	25	4:1	16~24	14.5~25.1	0.9~4.0	2.9~5.2	0.3~0.4
2	26~40	1	25	4:1	16~24	13.5~37.7	5.6~10.4	8.1~12.3	0.4~0.9
3	40~60	1	25	4:1	16~24	23.4~88.4	0.1~2.9	1.5~6.0	0.3~0.4
4	61~80	2	50	8:1	11~14	38.7~74.7	5.1~18.3	8.2~19.0	0.4~1.7
5	81~100	2	100	8:1	11~14	27.1~58.6	6.6~15.4	9.9~15.3	0.5~1.3

1) 此工况只针对曝气系统 M1、M3

1.3 检测项目与方法

试验检测的常见水质指标包括 COD、TN、TP、

NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 的测定, 检测频次为每周 3 次; 不定期检测水温、pH 值、溶解氧 (DO) 等指标. COD 测定采用

重铬酸钾法,TN 测定采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法,TP 测定采用钼锑抗分光光度法,NH₄⁺-N测定采用纳氏试剂法,NO₃⁻-N测定采用紫外分光光度法,水温、pH 值、DO 值采用仪器直接测定^[8].

2 结果与讨论

2.1 不同填料对污染物去除效果对比分析

2.1.1 对有机物的去除效果

MSL 系统中有机物去除可通过土壤及填料过滤、表面吸附及生物降解作用去除,其中生物降解作用占主导地位^[5].从表 3 中可以看到,各系统各工况下 COD 平均去除率均在 40% 以上,最高达到 80.6%.同时曝气系统 M1、M3 的总平均去除率为 69.0%、66.4%,分别稍优于 M2、M4 的总平均去除率 56.3%、54.5%,这说明曝气有利于有机物的去除.同时 MSL 系统 COD 去除效果受填料的影响不大,各系统出水浓度差异较小.除了在进水浓度较高的第 4 阶段,陶粒-红壤非曝气系统 M4 的去除效果下降,这主要是由于在高污染负荷下进水 DO < 1 mg/L,而 M4 内土壤的空隙率较小复氧能力较差,同时未设置曝气设施,系统内第 1 段 DO 仅有 0.69 mg/L远小于非曝气沸石-陶结系统的 1.11 mg/L,氧

气不足抑制了异养好氧菌的生长.因此陶粒-红壤需增加曝气系统(如 M3)促进 COD 的去除.

2.1.2 对氮的净化效果

MSL 系统内,氮的去除一部分通过上层植物土壤层吸收,但植物的净吸收和储存相对很少,一般不会超过总去除率的 15%^[9];另一部分进入系统,通过硝化反硝化或者填料吸附而去除.如图 2(a),无论曝气非曝气,沸石-陶结系统 M1、M2 的 NH₄⁺-N 出水浓度均小于 1 mg/L,达到国家地表水Ⅲ级标准(GB 3838-2002),并且出水水质稳定,不随进水浓度波动而波动,在高污染负荷下,NH₄⁺-N 平均去除率均在 90% 以上(如表 4).M1、M2 的高氨氮去除效率主要是由于沸石突出的氨氮吸附能力.但在第 3 阶段,此时进水 NH₄⁺-N 平均浓度为 1 mg/L,M2 出水浓度大于进水浓度,此阶段平均去除率为 -13.2%,系统内在高污染负荷时积累的氨氮有释放现象.相比之下,曝气系统 M1 不存在此类问题.

陶粒-红壤系统 M3 在低气水比条件下,如图 2(a),出水随进水波动较大,但在第 5 阶段增大气水比后,出水氨氮浓度迅速下降,平均去除率从 45.6%上升到 84.1%,接近 M1、M2 氨氮去除效果.M4 的氨氮去除效果较差,系统出水 NH₄⁺-N 浓度随

表 3 各个阶段各系统 COD 去除效率

Table 3 Efficiencies of each MSL systems on COD removal during different periods

参数	系统	运行阶段				
		1	2	3	4	5
进水污染物体积负荷/g·(m ³ ·d) ⁻¹		21.73 ± 4.9	27.69 ± 10.72	48.76 ± 23.28	112.5 ± 25.46	73 ± 24.28
系统去除负荷/g·(m ³ ·d) ⁻¹	M1	15.8 ± 4.9	24.4 ± 11.7	32.7 ± 20.9	75.3 ± 36.1	42.2 ± 13.1
去除率/%		71.6 ± 8.9	80.6 ± 6.9	60.8 ± 17.6	69.4 ± 19.9	60.6 ± 20.4
系统去除负荷/g·(m ³ ·d) ⁻¹	M2	11.8 ± 5.6	20.4 ± 13.8	28.4 ± 18.8	70 ± 33.2	39 ± 13.3
去除率/%		51.5 ± 17.3	55.5 ± 17.8	51.4 ± 16.8	67.6 ± 15.7	55.8 ± 21.3
系统去除负荷/g·(m ³ ·d) ⁻¹	M3	17.1 ± 4.3	22.4 ± 9.4	29.7 ± 22.2	69.4 ± 28.6	37.3 ± 16.5
去除率/%		74.1 ± 17.1	73.0 ± 7.7	62.5 ± 12.3	63.2 ± 15.2	59.5 ± 23.0
系统去除负荷/g·(m ³ ·d) ⁻¹	M4	13.6 ± 2.3	21.1 ± 9.4	27.8 ± 22.4	47.6 ± 28.3	30.2 ± 11.7
去除率/%		54.9 ± 9.4	65.6 ± 11.1	60.3 ± 11.2	49.2 ± 9.0	42.4 ± 15.1

表 4 各个阶段各系统氨氮去除效率

Table 4 Efficiencies of each MSL systems on NH₄⁺-N removal during different periods

参数	系统	运行阶段				
		1	2	3	4	5
进水污染物体积负荷/g·(m ³ ·d) ⁻¹		1.9 ± 1.8	8.5 ± 1.6	1.0 ± 0.9	26.7 ± 8.9	22.4 ± 7.2
系统去除负荷/g·(m ³ ·d) ⁻¹	M1	1.6 ± 2	8.5 ± 1.6	0.8 ± 1.0	26.2 ± 9.1	21.6 ± 7.1
去除率/%		53 ± 39.9	99.1 ± 1.6	67.4 ± 22.8	97.4 ± 3.6	96.2 ± 2.6
系统去除负荷/g·(m ³ ·d) ⁻¹	M2	1.5 ± 2.1	8.4 ± 1.6	0.5 ± 1.1	25.7 ± 9	21 ± 7.4
去除率/%		62.7 ± 32.3	97.2 ± 3.6	-13.2 ± 53.8	95.2 ± 4.1	92.7 ± 4.1
系统去除负荷/g·(m ³ ·d) ⁻¹	M3	1.8 ± 1.9	4.8 ± 3.3	0.5 ± 0.3	10.6 ± 3.8	18.4 ± 4.7
去除率/%		87.1 ± 19.2	47.4 ± 30.3	54.9 ± 21.1	45.6 ± 26.8	84.1 ± 10.6
系统去除负荷/g·(m ³ ·d) ⁻¹	M4	1.3 ± 2	4.5 ± 3.6	-0.3 ± 0.3	5.8 ± 2.8	1.3 ± 3.4
去除率/%		41 ± 42	38.3 ± 34.9	-32.6 ± 40.7	27.7 ± 25.5	3.5 ± 11.8

进水波动而波动,在第 1、2、4 阶段氨氮平均去除率在 25%~40%之间,但在第 3、5 阶段进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度从高浓度向低浓度下降,M4 的氨氮平均去除率分别下降到 -32.6%和 3.5%,这主要由于系统内在高浓度阶段累积还未进行硝化的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 随低浓度源水而流出系统。

如表 5,非曝气系统的 TN 去除效果优于曝气系统,M2 的去除效果最为显著,各阶段出水 TN 浓度

均小于 1 mg/L,平均去除率在 68%以上,最高达到 98.6%。而曝气系统总氮去除效果差主要是因为出水硝氮浓度较高,硝氮平均去除率均为负值,尤其在高气水比条件下,如图 2(b),出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度分别从第 4 阶段的 4.2 mg/L、4.5 mg/L 增加到第 5 阶段的 9.6 mg/L、12.1 mg/L,TN 浓度也随之增加,平均去除率分别下降到 34.3%、1.5%。这说明过量曝气会导致系统内硝氮的积累降低总氮的去除率。

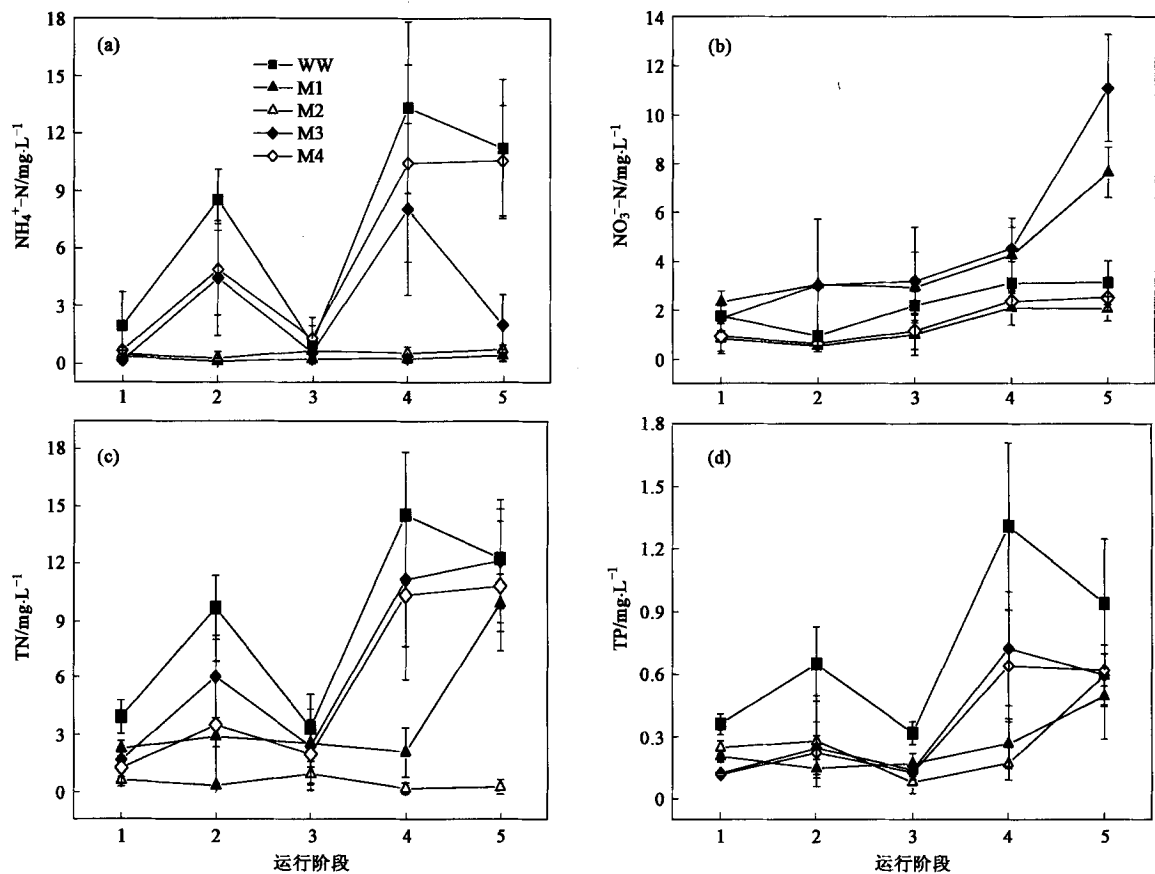


图 2 各系统在不同阶段的进出水 N、P 浓度比较

Fig.2 Concentrations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, TN, TP in the wastewater and in the treated water of the four MSL systems in different periods

表 5 各个阶段各系统总氮去除效率

Table 5 Efficiencies of each MSL systems on TN removal during different periods		运行阶段				
参数	系统	1	2	3	4	5
进水污染物体积负荷/ $\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$		3.9 ± 0.9	9.6 ± 1.7	3.3 ± 1.8	29.0 ± 6.7	24.4 ± 5.2
系统去除负荷/ $\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$	M1	1.8 ± 1.1	6 ± 0.7	0.8 ± 0.7	25 ± 5.5	8.7 ± 4.2
去除率/%		42.0 ± 16.0	67.7 ± 3.8	23.5 ± 8.7	86.2 ± 8.2	34.3 ± 10.5
系统去除负荷/ $\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$	M2	3.4 ± 0.9	8.6 ± 1.1	2.4 ± 2	28.8 ± 7	24 ± 4.6
去除率/%		85.8 ± 2.6	96.8 ± 1.1	68.9 ± 24.3	98.5 ± 3.4	98.6 ± 2.5
系统去除负荷/ $\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$	M3	2.3 ± 1.1	4 ± 1.4	1 ± 0.6	6.8 ± 3	0.3 ± 2.3
去除率/%		57.5 ± 18.8	40.9 ± 17.4	43.6 ± 19.5	27.6 ± 14.3	1.6 ± 10.4
系统去除负荷/ $\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$	M4	2.7 ± 1.5	6.5 ± 2.4	1.4 ± 0.3	8.4 ± 3.1	2.9 ± 2.1
去除率/%		67.8 ± 29.1	67.8 ± 30.5	50.5 ± 20.9	32.6 ± 20.9	13.2 ± 10.6

沸石-陶结系统 M1、M2 的氨氮去除效果优于陶粒-红壤系统 M3、M4,并且出水水质稳定.曝气系统 M1、M3 的氨氮去除效果分别优于相同填料非曝气系统 M2、M4.同时在高气水比条件下,陶粒-红壤 M3 系统硝化作用增强,氨氮去除效果接近沸石-陶结系统,但系统反硝化不足,造成系统 TN 去除率迅速降低.非曝气沸石-陶结系统 M2 的 TN 去除效果最佳.其他 3 个系统在不同工况下 TN 去除效果差别较大.

2.1.3 对磷去除效果及分析

模拟实验系统对磷的净化效果列于表 6 及图 2 (d). MSL 系统中磷的去除主要通过物化作用 (physicochemical reaction),对于 M1、M2 沸石-陶结系统,沸石属于磷吸附能力较强的填料,并且 ML 层中填有铁屑,在氧化环境下可以分解出 Fe 离子并形成铁氢氧化物沉淀磷酸盐. M3、M4 陶粒-红壤系统,磷可通过土壤基质表面的 Al、Fe、Ca 等离子微弱的物理吸附及较强的化学吸附而去除,可以认为磷在土壤中几乎是不动的^[10,11].同时 ML 层中添加的水洗钢渣也具有较强的磷吸附能力.在系统运行初期,如表 6, M3、M4 的 P 去除效果优于 M1、M2,这跟土壤对磷的强吸附能力有关.但在接下来 4 个阶段 M3、M4

的去除效果有所下降.这可能是由于系统内土壤只占 ML 层的 30%,因此土壤对磷的吸附和进水中的磷降低达到平衡后,进水中磷的减少幅度就会变小.而在高浓度下 M1、M2 去除效果突出,在第 2、4 工况下平均去除率分别达到 81.6%、66.0%和 80.3%、88.1%.分析原因,一方面由于 M1、M2 中含有大量的沸石,有研究表明,根据静电吸附理论异性电荷互相吸引的原理,在较低的 pH 值时,沸石表面带正电荷;磷则是以磷酸根形式存在于水溶液中,沸石很容易吸附携带异性电荷的磷酸根离子,同时沸石对磷的吸附作用以静电吸附为主^[12].本试验沸石系统内的 pH 值一般为 7.0~7.5 左右,在此范围,沸石的磷吸附率为 20%~30%,由于系统内有大量的沸石,因此磷吸附能力表现比较明显;另一方面,由于 MSL 系统的空间结构布置,PL 层的流过的废水的比例大于 ML 层,当水力负荷增大时,PL 层的水量增大比例 (446%) 远远大于 ML 层 (65%)^[13]. M1、M2 的 PL 层填料沸石的粒径比 M3、M4 的 PL 层填料陶粒的粒径小,因此比表面积较大,和废水接触比较充分.虽然 M3、M4 系统中的 ML 层中有大量土壤,但由于孔隙率较小,所经水量较小,与废水接触不充分.

表 6 各个阶段各系统总磷去除效率
Table 6 Efficiencies of each MSL systems on TP removal during different periods

参数	系统	运行阶段				
		1	2	3	4	5
进水污染物体积负荷/ $\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$		0.36 ± 0.05	0.65 ± 0.18	0.33 ± 0.07	2.86 ± 0.42	1.87 ± 0.62
系统去除负荷/ $\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$	M1	0.17 ± 0.06	0.64 ± 0.09	0.17 ± 0.12	2.29 ± 0.29	0.89 ± 0.55
去除率/%		44.9 ± 9.8	81.6 ± 5.1	47.6 ± 24.0	80.3 ± 5.7	43.5 ± 15.9
系统去除负荷/ $\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$	M2	0.13 ± 0.02	0.51 ± 0.17	0.24 ± 0.08	2.52 ± 0.37	0.69 ± 0.5
去除率/%		34.2 ± 2.9	66.0 ± 23.7	72.5 ± 18.3	88.1 ± 4.8	32.7 ± 17.8
系统去除负荷/ $\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$	M3	0.24 ± 0.06	0.36 ± 0.19	0.17 ± 0.07	1.3 ± 0.45	0.68 ± 0.34
去除率/%		66.0 ± 7.6	58.6 ± 18.0	51.9 ± 16.7	45.5 ± 15.2	34.8 ± 6.9
系统去除负荷/ $\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$	M4	0.25 ± 0.06	0.38 ± 0.18	0.21 ± 0.08	1.44 ± 0.21	0.64 ± 0.13
去除率/%		68.1 ± 5.1	61.7 ± 13.5	61.2 ± 12.2	50.7 ± 6.8	38.1 ± 16.7

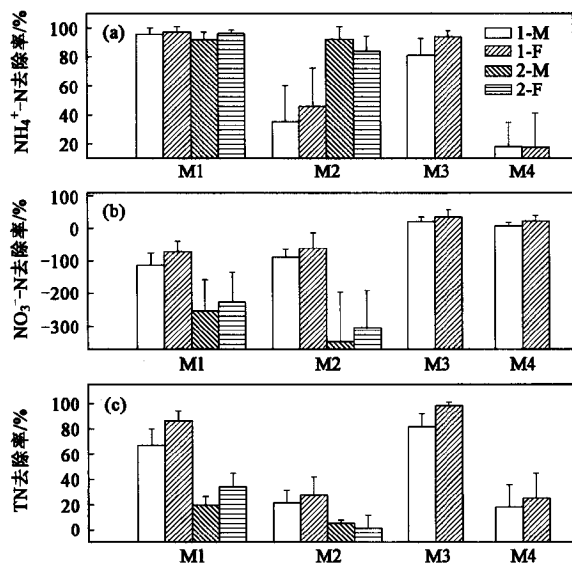
2.2 氮去除效果沿程变化机制分析

由于 M1、M2 系统和 M3、M4 系统的 PL 层和 ML 层均采用不同的填料,造成这 2 组系统的氮去除机制有很大的差异. M1、M2 系统 PL 层采用沸石,因为沸石具有良好的氨氮吸附能力,因此 M1、M2 系统主要通过沸石化学吸附和离子交换作用除氮^[14].而 M3、M4 系统主要通过微生物硝化反硝化除氮.下面通过分析第 4、5 工况下各系统沿程氮转化效率来探讨了各系统的氮去除机制.

曝气系统 M1、M3 一段底部设有穿孔曝气管,试验得出 M1 在第 1 段即可基本去除污水中的氨氮 [图 3(a)],在低气水比和高气水比下 M1 中间出口

和最终出口的氨氮平均去除率分别为 95.6%、97.4%和 92.2%、96.2%,受气水比的影响不大.但在第 5 阶段高气水比下,中间出口硝氮平均去除率从 -113%降低到 -253%,第 1 段硝化作用除氮的比例明显增加.陶粒-土壤系统 M3 在低气水比下氨氮平均去除率只有 45.6%,在第 5 阶段高气水比下中间出口的平均去除率达到 92.5%,M3 中间出口出水硝氮平均去除率达到 -347%,硝化反应大幅提高.同时在高气水比下, M3 的硝化强度略高于 M1,说明 M3 通过生物除氮也可达到 M1 的氨氮去除效果,甚至优于 M1.但 M3 中间出口出水经过第 2 段后平均去除率略有下降,至 84.1%.根据分析可能

由于第1段出水氨氮浓度较低,经过第2段使吸附在土壤层中的氨氮有解吸现象.M1、M3均存在第2段反硝化不足的现象,如图3(b),高气水比下M1、M3系统出水硝氮平均去除率分别为-226%、-304%,最终总氮平均去除率仅有34.3%和1.6%,出水中硝氮浓度占总氮浓度的80%以上.这主要是由于硝化反应过强同时也有系统内原有储存氨氮的释放^[3,15],缺氧段反硝化不足也是造成总氮去除率低的另一主要原因.



“1”代表气水比为4:1,“2”代表气水比为8:1;

M代表系统中间出口,F代表系统最终出口

图3 第4、5阶段各系统中间出口及最终出口氮去除效果比较

Fig.3 Comparison of the NH_4^+-N , NO_3--N and TN removal efficiencies of the middle effluent and final effluent between the four MSL systems during the four and five periods

非曝气系统M2、M4主要通过表层复氧及植物根系传递氧气进入系统.沸石-陶结系统M2的总氮去除效果最佳[图3(c)],并主要在第1段去除,中间出口平均去除率达到82%,从中间出口到最终出口平均去除率仅增加了16%.M2氨氮与硝氮在中间出口和最终出口的平均去除率第1段81.2%和20.7%;第2段分别为94.2%和34.5%.可见第1段并无明显的硝化作用,氨氮主要通过沸石吸附.陶粒-红壤系统M4氨氮去除效果不显著[图3(a)],并主要在第1段,中间出口和最终出口的平均去除率分别为18.1%、17.6%.M2、M4系统内具有较弱的反硝化反应,最终出口平均硝氮去除率在10%~35%之间.

由此可见,4个系统缺氧段均存在反硝化不足

的现象,曝气系统尤其明显.由于各系统内第2段缺氧段DO值均 $<1\text{ mg/L}$,符合反硝化厌氧环境条件,因此反硝化不足的主要原因是碳源不足.试验原水C:N($\text{BOD}_5:\text{NH}_4^+-\text{N}$)仅在0.8左右,根据研究表明要保证反硝化C/N比应保持在4~5^[7].要增加MSL系统内反硝化强度,可采取增大进水碳氮比、分段进水等措施.曝气系统也需考虑间歇曝气和选择合适的气水比,保证系统内的反硝化厌氧环境.

3 结论

(1)MSL系统中有机物去除可通过土壤及填料过滤、表面吸附及生物降解作用去除,其中生物降解作用占主导地位.4个系统COD去除效果受填料影响不大,各系统各工况下COD平均去除率均在50%以上,最高达到80.6%.同时曝气系统M1、M3的总平均去除率为69.0%、66.4%,分别优于M2、M4的总平均去除率56.3%、54.5%,这说明曝气有利于有机物的去除.

(2)沸石-陶结系统,主要通过沸石物理吸附除氮;陶粒-土壤系统主要通过生物硝化反硝化除氮.无论曝气与否,沸石-陶结系统M1、M2均具有高氨氮去除能力, NH_4^+-N 出水浓度均小于 1 mg/L ,达到国家地表水Ⅲ级标准(GB 3838-2002).陶粒-红壤MSL系统在高气水比条件下,最终出口平均去除率达到84.1%,在非曝气条件下氨氮去除能力相对较差,在40%以下.非曝气沸石-陶结系统M2具有最佳总氮去除效果,平均去除率最高达到98%.4个系统缺氧段均存在反硝化不足的现象,曝气系统尤其明显,通过分析主要由碳源不足引起.要增加MSL系统内反硝化强度,可采取增大进水碳氮比、分段进水等措施.

(3)MSL系统中磷的去除主要通过物化作用(physicochemical reaction).沸石-陶结系统主要通过沸石吸附除磷,陶粒-土壤系统主要通过土壤物理吸附及较强的化学吸附而去除.在系统运行初期,M3、M4的P去除效果优于M1、M2,这跟土壤对磷的强吸附能力有关.而稳定期高污染负荷下,沸石-陶结系统(M1、M2)的磷去除能力较强.在第2、5工况下平均去除率分别达到81.6%、66.0%和80.3%、88.1%.

(4)沸石-陶结系统的污染物去除氮的性能一般情况下优于陶粒-红壤系统.但沸石-陶结系统存在沸石吸附饱和的问题,如果采用重换填料,使用寿命较短.采取曝气方式可促进沸石的生物再生,增加系

统使用寿命,并且在低气水比条件下(第4阶段)可达到最佳污染物去除效果。

(5)陶粒-红壤系统主要以生物机制去除污染物,使用寿命长,相比沸石-陶结系统具有更好的经济实用价值。本研究已证实陶粒-红壤系统在高气水比条件下(第5阶段)可达到与沸石-陶结系统相同的氨氮去除效果,同时也具有较好的有机物及磷去除效果。

(6)MSL系统作为一种新型高效的土地处理系统,目前在国内还未广泛推广,但模块化的理念很好地解决了传统土地处理系统的堵塞、氮磷去除效果差等缺陷,并且模块制作过程简单,成本低,具有很大的发展潜力。

参考文献:

- [1] Luanmanee S, Attanandana T, Masunaga T, *et al.* The efficiency of a multi-soil-layering system on domestic wastewater treatment during the ninth and tenth years of wastewater treatment during the ninth and tenth years of operation[J]. *Eco Eng*, 2001, **18**(2): 185-199.
- [2] Attanandana T, Saitthit B, Thongpae S, *et al.* Multi-media-layering system for food service wastewater treatment[J]. *Eco Eng*, 2000, **15**(1-2): 133-138.
- [3] Luanmanee S, Boonsook P, Attanandana T, *et al.* Effect of intermittent aeration regulation of a multi-media-layering system on domestic wastewater treatment in Thailand[J]. *Eco Eng*, 2002, **18**(4): 415-428.
- [4] Boonsook P, Luanmanee S, Attanandana T, *et al.* A comparative Study of Permeable Layer Materials and aeration regime on efficiency of Multi-soil-layering system for domestic wastewater treatment in Thailand[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2003, **49**(6): 873-882.
- [5] Sato K, Masunaga T, Wakatsuki T. Characterization of treatment processes and mechanisms of COD, Phosphorus and Nitrogen Removal in a Multi-Soil-Layering System[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2005, **51**(2): 213-221.
- [6] Masunaga T, Sato K, Mori J, *et al.* Characteristics of waste water treatment using a multi-soil-layering system in relation to wastewater contamination level and hydraulic loading rates[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2007, **53**(2): 215-223.
- [7] Chen X, Sato K, Wakatsuki T, *et al.* Effect of structural difference on wastewater treatment efficiency in Multi-soil-layering systems: relationship between soil mixture block size and removal efficiency of selected contaminants[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2007, **53**(2): 206-214.
- [8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [9] 何连生, 刘鸿亮, 席北斗, 等. 人工湿地氮转化与氧关系研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(6): 1083-1087.
- [10] Zhang J, Huang X, Liu C X, *et al.* Nitrogen removal enhanced by intermittent operation in a subsurface wastewater infiltration system[J]. *Ecol Eng*, 2005, **25**(4): 419-428.
- [11] 杨丽萍, 田宁宁, 褚富春. 土壤毛管渗滤污水净化绿地利用研究[J]. *城市环境与城市生态*, 1999, **12**(3): 4-7.
- [12] 赵增迎, 黄成华. 沸石吸附沸水中的磷污染物的研究[J]. *上海化工*, 2005, (5): 5-7.
- [13] Sato K, Masunaga T, Wakatsuki T. Water Movement Characteristics in a Multi-Soil-Layering System[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2005, **51**(1): 75-82.
- [14] 张曦, 吴为中, 温东辉, 等. 生物沸石床污水脱氮效果及机理[J]. *环境科学*, 2003, **24**(5): 75-80.
- [15] Luanmanee S, Boonsook P, Attanandana T, *et al.* Effect of organic components and aeration regimes on the efficiency of a Multi-soil-layering system for domestic wastewater treatment[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2002, **48**(2): 125-134.