

两段式混合滤料渗滤系统处理模拟废水

陈坤¹ 冯传平^{1*} 李文奇²

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京 100083;
2. 中国水利水电科学研究院水环境研究所,北京 100038)

摘要 两段式混合滤料渗滤系统在土壤渗滤系统的基础之上,加强反硝化反应,进而强化脱氮过程。为强化脱氮,整个系统被分成好氧段和厌氧段。混合滤料的使用可有效防止系统堵塞。厌氧段添加的锯末草灰为反硝化反应提供了足够的碳源,因此运行初期厌氧段内 NO_3^- -N 去除率可达 100%。同时铁屑的添加除强化还原环境外还加强了 TP 的去除效果。采用模拟废水的研究结果表明:运行稳定后,该系统对 COD、 NH_4^+ -N、TN 和 TP 的平均去除率分别达到了 87.7%、82.6%、81.0% 和 90.4%。

关键词 两段式 混合滤料 渗滤系统 模拟废水

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2012)06-1947-05

Treatment of simulated wastewater by two-stage mixed-media infiltration system

Chen Kun¹ Feng Chuanping¹ Li Wenqi²

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
2. Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract In the present study, two-stage mixed-media infiltration system was developed for treating simulated wastewater. To improve the nitrogen removal efficiency, the system was divided into aerobic stage and anaerobic stage. It was found that the mixed-media filled in the system had good performance for solving the clogging problem which is always observed in traditional soil infiltration. Sawdust and leaf powders were added in anaerobic stage to provide organic carbon source which was needed in denitrification process, so NO_3^- -N removal efficiency was 100% in anaerobic stage during the initial period. Moreover, the reduction environment was improved and the TP removal efficiency was increased by iron addition in the anaerobic stage. The results indicated that the average removal efficiency of COD, NH_4^+ -N, TN and TP reached 87.7%, 82.6%, 81.0%, 90.4%, respectively.

Key words two-stage; mixed-media; infiltration system; simulated wastewater

20 世纪 70 年代以来,土地处理系统得到了广泛关注,目前常用的工艺有地表漫流、土壤渗滤、人工湿地等。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^[1-4]。20 世纪 90 年代由日本首次提出的多级土壤渗滤(MSL)系统,其基于土壤模块化的理念在系统内形成多个好氧、厌氧环境可促进对污染物的去除^[5]。虽然 MSL 系统中的曝气可促进 COD、 NH_4^+ -N 以及 TP 的去除效果,但过量曝气会造成由反硝化不足引起的出水 NO_3^- -N 浓度过高,降低 TN 去除率^[6]。同时,MSL 系统中由于有机物在好氧细菌作用下被分解,导致混合滤料层反硝化反应所需的碳源不足,使脱氮效果不明显。魏才婕等^[7]通过两段式渗滤系统以及分段进水的方式来补充因有机物降

解而缺失的碳源从而强化脱氮过程。汤丽华等^[8]则将快速渗滤系统分成两段以解决渗滤系统普遍存在的堵塞问题。还有学者研究两段式厌氧槽和地沟串联组成的渗滤系统可将 TN 去除率提高至 68%~75%^[9]。

为避免好氧环境对反硝化反应的干扰,本实验将好氧段和厌氧段分开,同时在系统厌氧段添加锯末和草灰使其溶出有机物来补充碳源。厌氧段内添

基金项目:水利部公益性行业科研专项(20090107-01);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2-9-2011-218)

收稿日期:2010-12-29; 修订日期:2011-02-22

作者简介:陈坤(1987~),女,硕士,主要从事水污染控制技术研究工作。E-mail:ckeldq@163.com

* 通讯联系人,E-mail:fengchuanping@gmail.com

加的铁屑可以强化还原环境和除磷效果。实验中采用混合滤料作为装填介质可有效防止渗滤系统的堵塞。

1 材料与方法

1.1 实验原水

为有效控制实验条件,实验原水是使用自来水、氯化铵、葡萄糖和磷酸二氢钾配置的人工模拟废水。模拟废水中 COD 浓度在 52.8 ~ 256.1 mg/L 之间波动,由于进水槽暴露在空气中,适宜温度下的微生物活动较为活跃,因此 COD 值变化较大。模拟原水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP 浓度分别为 26.0 ~ 42.5 mg/L、27.4 ~ 42.6 mg/L 和 1.7 ~ 3.9 mg/L。实验期间原水的 pH 和温度变化不大,分别为 6.60 ~ 7.38 和 16.6 ~ 26.6℃。

1.2 实验装置

实验装置如图 1 所示。整个系统分成两段,即好氧段和厌氧段。柱 1 为好氧段,柱 2 为厌氧段,两柱串联。

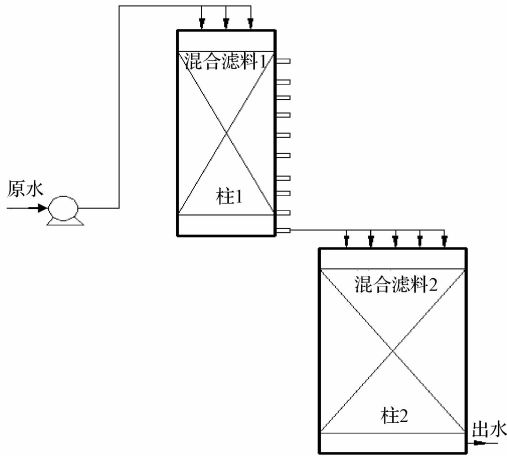


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Diagram of the experimental apparatus

柱 1 和柱 2 的规格分别为 20 cm × 20 cm × 50 cm 和 20 cm × 30 cm × 50 cm。柱 1 通过顶端及侧端小孔与空气接触自然复氧;柱 2 处于密封状态。模拟废水通过蠕动泵进入柱 1 顶端,依靠渗滤和重力作用依次流经好氧段和厌氧段,最后经厌氧段底部流出系统。

1.3 系统滤料组成及运行工况

渗滤系统中好氧段和厌氧段所使用的混合滤料略有不同。2 种混合滤料组成(质量比)见表 1。其

表 1 混合滤料组成

Table 1 Quality of raw water (%)

项目	砂	石英砂	火山岩	沸石	活性炭	铁屑	锯末+草粉
柱 1	50	20	15	10	5	-	-
柱 2	50	15	10	10	5	5	5

中,石英砂、火山岩、沸石、活性炭以及铁屑的颗粒大小为 2 ~ 4 mm,砂的粒径大小为 0.5 ~ 1 mm,锯末和草粉则选用粒径 < 0.5 mm 的较细组分。将混合滤料混合均匀,柱 1 滤料、柱 2 滤料分别接种某污水处理厂曝气池和二沉池污泥,之后装填滤柱,两柱混合滤料层均为 40 cm。

实验过程分为启动期和稳定运行期,启动期为 1 ~ 32 d;稳定运行期为 33 ~ 62 d。蠕动泵的流速为 15 mL/min,系统运行过程中控制水力负荷为 0.54 $\text{m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$,干湿比为 1:1。

1.4 分析检测指标与方法

本实验监测常规指标包括:水温、pH、COD、TN、TP、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。其中,COD、TN、TP、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 分别采用重铬酸钾法、过硫酸钾-紫外分光光度法、钼酸铵分光光度法、纳氏试剂比色法和紫外分光光度法进行监测^[10]。

根据实验需要,在北京大学分析测试中心对锯末和草粉进行微量有机元素分析。将样品清洗干燥后研磨成相同粒径的粉末用 Perkin-Elmer 2400 Series 2 CHNS 元素分析仪分析样品中的元素组成。分析结果表明:锯末中 C、N、H 平均百分含量分别为 46.99%、0.01% 和 6.39%;草粉中 C、N 和 H 平均百分含量分别为 45.42%、0.25% 和 6.21%。

2 结果与讨论

2.1 对有机物的去除效果

两段式混合滤料渗滤系统对有机物的去除主要依靠混合滤料的过滤、表面吸附及其所截留的微生物对有机物的降解,其中微生物作用占主导地位^[11],微生物对有机物的降解主要发生在好氧段。

柱 2 出水的 COD 值变化较大,整个运行过程中,柱 2 出水 COD 值比柱 1 出水的 COD 值都大,这是因为柱 2 滤料中含有锯末和草粉,这两种物质能不断溶出有机物,微量有机元素分析数据显示:锯末和草粉中 C 的平均百分含量分别达到了 46.99% 和 45.42%,这两种物质溶出的有机物使柱 2 出水的 COD 值升高。即便在存在外来有机物的情况下,稳

定运行后,系统对原水 COD 依然保持着较高的去除率。如图 2 所示,32 d 以后,系统对 COD 的总去除率均在 60% 以上,平均去除率达到了 87.7%。这两种物质能溶出有机物,且草灰的溶出速率远大于锯末。前期启动系统时,草粉能在短期内溶出大量有机物,保证厌氧段微生物可以快速适应环境;张建等^[12]研究表明,添加草炭可有效缩短系统的启动期。而锯末溶出有机物的速度较缓慢,且溶出量稳定,可保证后期系统稳定运行时厌氧微生物的正常生长。因此启动期内柱 2 出水 COD 值远大于柱 1,且波动较大;而在稳定期,柱 2 出水 COD 值虽然仍比柱 1 出水大,但已明显减小,大部分都在 20 mg/L 以下。这说明系统对有机污染物有很好的去除能力。

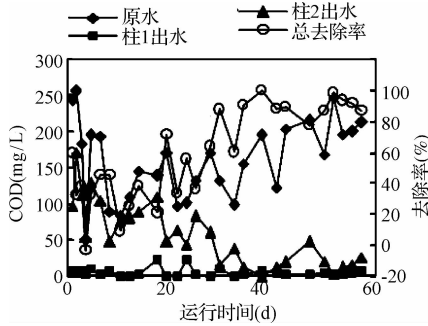


图 2 渗滤系统对 COD 的去除效果

Fig.2 Removal efficiency of COD by the infiltration system

2.2 对氮的去除效果

在两端式混合滤料渗滤系统在不同的运行阶段对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 TN 的去除效果如图 3 所示。根据系统的设置,将硝化过程和反硝化过程分开,硝化反应主要发生在柱 1 内,反硝化反应主要发生在柱 2 内。

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除包括两个方面:混合滤料的截留吸附和氨氮的硝化反应。滤料中沸石、火山岩和活性炭都能截留一部分 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 。其中沸石是通过化学吸附和离子交换作用去除 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的^[13]。如图 3(a) 所示,原水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度在 26.0 ~ 42.5 mg/L 之间波动,柱 1 出水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度在整个运行过程中都很低,均 < 1.0 mg/L, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均去除率达到了 99% 以上。Pell 等^[14] 的研究表明,表层土壤的通气传氧性好,利于硝化细菌生长,在 6.7 cm/d 的水力负荷下,表层的土壤即可去除 80% 以上的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 。柱 2 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 值比柱 1 出水高,这是因为柱 2 内锯末和草粉中含有有机氮,其中草粉中 N 含量

较多,经检测草粉中 N 的百分含量约为 0.25% 而锯末中 N 的百分含量仅为 0.01%,这两种物质中的有机氮发生氨化反应生成了 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 使柱 2 出水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度升高。系统稳定后,因有机氮消耗,柱 2 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度逐渐降低。进入稳定期后,整个系统对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均去除率达到了 82.6%。

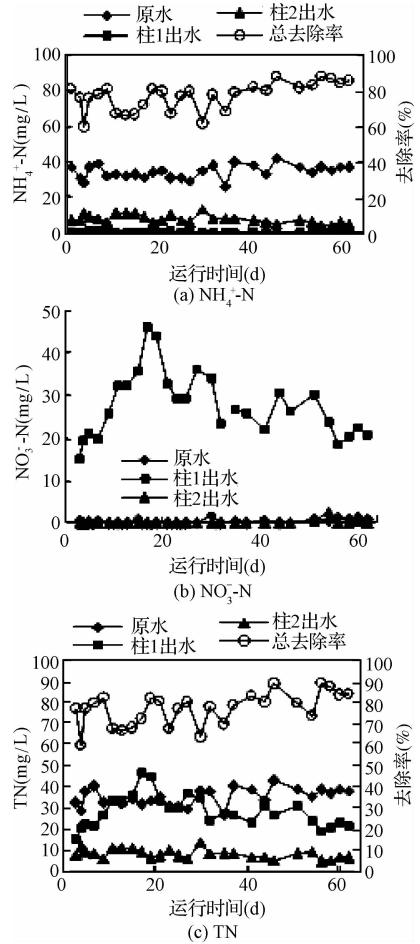


图 3 渗滤系统对氮的去除效果

Fig.3 Removal efficiency of nitrogen by the filtration system

模拟废水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量较低。系统中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 主要是 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 发生硝化反应产生的。如图 3(b) 所示,柱 1 出水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量远大于进水,这与 2.1 解释的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除机理相吻合。系统产生的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除主要依靠厌氧微生物的反硝化作用^[15],反硝化菌的生长繁殖需要充足的碳源和适宜的温度。柱 1 中有机质的迅速降解使得反硝化菌可利用的碳源不足,而好氧环境亦不利于反硝化菌的生长繁殖,由此导致 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 积累。整个运行过程中,系统对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除效果受温度的影响不大。柱 2 出水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度一直很低,特别是启动期

内, NO_3^- -N 浓度几乎检测不到, 去除率达到了 100%, 这主要是因为启动期厌氧段内的锯末和草粉特别是草粉不断溶出有机物(经检测锯末和草粉中 C 的平均百分含量分别为 46.99% 和 45.42%), 为反硝化菌的生长提供足够的碳源, 反硝化反应能彻底进行, 因此 NO_3^- -N 去除率很高。稳定期, 虽偶尔有波动, 但 NO_3^- -N 去除率也很高, 厌氧段的平均去除率达到了 98.6%。

当系统中 NH_4^+ -N 在硝化菌作用下转变成 NO_3^- -N, 这时氮并未从系统中去除, TN 浓度依然很高。之后 NO_3^- -N 在厌氧菌作用下, 通过反硝化作用变成 N_2 和 N_2O 从系统排出, 才达到脱氮的目的。系统进水中的 TN 以 NH_4^+ -N 为主, 而柱 1 出水中的 TN 则基本上全部为 NO_3^- -N。这说明柱 1 内部的硝化反应进行得很彻底, 而反硝化反应较差则是系统 TN 去除率不高的主要原因。如图 3(c) 所示, 在启动期内, 柱 2 出水中 TN 浓度存在比较小的波动, 进入稳定运行期后, TN 浓度趋于稳定, 且有逐渐减小的趋势, 最低时达到了 4.5 mg/L。这时, 整个系统对 TN 的去除率达到了 88.3%。稳定期最低去除率也达到了 69.2%, TN 的平均去除率为 81.0%。对比发现, 柱 2 对 NO_3^- -N 和 TN 的去除效果呈现出一致性。张建等^[15] 研究结果显示地下渗滤污水处理系统对 TN 的去除率为 63.5%。而土地毛细管渗滤系统对城市生活污水 TN 去除率仅为 30.7%^[16], 可见本系统具有良好的 TN 去除性能。

2.3 对磷的去除效果

系统对 TP 的去除效果见图 4。系统对磷的去除是物化作用和微生物共同作用的结果, 其中, 物化作用占主导。这里的物化作用包括混合滤料对磷的吸附及与铁等形成沉淀。

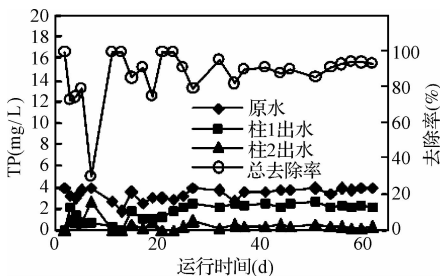


图 4 渗滤系统对 TP 的去除效果

Fig. 4 Removal efficiency of TP by the infiltration system

系统原水中 TP 含量在 1.7 ~ 3.9 mg/L 之间波动, 启动期内, 柱 1 和柱 2 出水中 TP 浓度变化没有

规律, 很不稳定; 稳定运行期后, 柱 1 出水 TP 浓度很稳定, 在 2.1 ~ 2.6 mg/L 的小范围内波动; 而柱 2 出水中 TP 浓度基本都 ≤ 0.5 mg/L, 最低时达到了 0.2 mg/L。稳定期系统总去除率最低时都达到了 82.2%, 最高时达 94.1%, 平均去除率为 90.4%。该系统对磷具有很好的去除能力, 主要与混合滤料多样性有关, 滤料中的不同介质对磷都有一定吸附作用; 同时, 柱 2 中铁与水中磷反应生成难溶性磷酸盐, 从而达到对磷的截留^[17]。对比发现柱 2 去除率要明显大于柱 1 去除率, 主要因为: 一是柱 2 容积较柱 1 大, 所含滤料较多, 吸附能力也就较强; 二是柱 2 中含的铁粉可与水体中的磷酸盐形成沉淀, 从而从水体中去除。

3 结论

(1) 两段式混合滤料渗滤系统对模拟废水的净化效果较好, 系统在稳定运行期内, 对 COD、 NH_4^+ -N、TN 和 TP 的平均去除率分别为 87.7%、82.6%、81.0% 和 90.4%。

(2) 两段式混合滤料渗滤系统的好氧段和厌氧段串联运行。好氧段通过自然复氧, 利于硝化细菌和好氧细菌生长, 因此主要进行 NH_4^+ -N、磷的吸附, NH_4^+ -N 的硝化反应以及好氧微生物对有机物的降解。稳定运行后, 好氧段对 NH_4^+ -N 和 COD 的平均去除率分别达到了 99.1% 和 97.2%。

(3) 系统厌氧段主要进行的是反硝化反应及磷的吸附和截留, 厌氧段混合滤料中添加了锯末、草粉和铁屑。锯末、草粉为反硝化细菌生长繁殖提供充足的碳源。铁屑可与磷酸盐反应生成沉淀, 提高系统对 TP 的去除率。

参考文献

- [1] Kong H. N., Yuzuru K., Motoyukim, et al. Study of the characteristics of CH_4 and N_2O emission and methods of controlling their emission in the soil-trench wastewater treatment process. *Science of the Total Environment*, **2002**, 290(1-3): 59-67
- [2] Lucas A., Rodriguez L., Villasnor J., et al. Denitrification potential of industrial wastewaters. *Water Research*, **2005**, 39(15): 3715-3721
- [3] 何江涛, 马振民, 张金炳, 等. 污水渗滤土地处理系统中的堵塞问题. *中国环境科学*, **2003**, 23(1): 85-89
He Jiangtao, Ma Zhenmin, Zhang Jinbing, et al. Discussion on the problem of clogging in wastewater infiltration land

- treating systems. *China Environmental Science*, **2003**, 23 (1):85-89 (in Chinese)
- [4] 成徐洲,吴天宝,陈天柱,等. 土壤渗滤处理技术研究现状与进展. *环境科学研究*, **1999**, 12(4):33-36
Cheng Xuzhou, Wu Tianbao, Chen Tianzhu, et al. Soil aquifer treatment technology: State of the art and perspective. *Research and Environmental Science*, **1999**, 12(4):33-36 (in Chinese)
- [5] 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 operation. *Ecol. Eng.*, **2001**, 18(2):185-199
- [6] Luanmanee S., Boonsook P., Attanandana T., et al. Effect of intermittent aeration regulation of a multi-media-laying system on domestic wastewater treatment in Thailand. *Ecological Engineering*, **2002**, 18(4):415-428
- [7] 魏才婕,朱擎,吴为中,等. 两段式沸石多级土壤渗滤系统强化脱氮实验. *中国环境科学*, **2009**, 29(8):833-838
Wei Caijie, Zhu Qing, Wu Weizhong, et al. Study of improving nitrogen removal efficiency of two-stage multi-soil-layering filled zeolite in permeable layer. *China Environmental Science*, **2009**, 29(8):833-838 (in Chinese)
- [8] 汤丽华,杨健,娄山杰. 两段式蚯蚓强化快速渗滤系统的实验研究. *环境污染与防治*, **2008**, 30(11):9-12
Tang Lihua, Yang Jian, Lou Shanjie. Effects of hydraulic loading on performance of earthworm enhanced two-stage rapid filtration system. *Environmental Pollution and Control*, **2008**, 30(11):9-12 (in Chinese)
- [9] Ye Chun, Hu Zhanbo, Kong Hainan, et al. A new soil infiltration technology for decentralized sewage treatment: Two-stage anaerobic tank and soil trench system. *Pedosphere*, **2008**, 18(3):401-408
- [10] 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**
- [11] Sato K., Masunaga T., Wakatsuki T. Characterization of treatment processes and mechanisms of COD, phosphorus and nitrogen removal in a multi-soil-layering system. *Soil. Sci. Plant. Nutr.*, **2005**, 51(2):213-221
- [12] 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. *中国给水排水*, **2004**, 20(6):41-43
Zhang Jian, Huang Xia, Shi Hanchang, et al. Domestic wastewater treatment using soil absorption with peat addition. *China Water & Wastewater*, **2004**, 20(6):41-43 (in Chinese)
- [13] 张曦,吴为中,温东辉,等. 生物沸石床污水脱氮效果及机理. *环境科学*, **2003**, 24(5):75-80
Zhang Xi, Wu Weizhong, Wen Donghui, et al. Effect and mechanism of removal of nitrogen in the mimic sewage using bio-zeolite system. *Environmental Science*, **2003**, 24(5):75-80 (in Chinese)
- [14] Pell M., Nyberg F. Infiltration of wastewater in a newly started pilot sand-filter system: Reduction of organic matter and phosphorus. *Journal of Environmental Quality*, **1989**, 18(4):451-475
- [15] 张建,黄霞,魏杰,等. 地下渗滤污水处理系统的氮磷去除机理. *中国环境科学*, **2002**, 22(5):438-441
Zhang Jian, Huang Xia, Wei Jie, et al. Nitrogen and phosphorus removal mechanism in subsurface wastewater infiltration system. *China Environmental Science*, **2002**, 22(5):438-441 (in Chinese)
- [16] 吴敏,阙愿林,杨健. 土地毛细管渗滤系统对城市生活污水的季节性处理效果. *苏州科技学院学报(工程技术版)*, **2008**, 21(1):13-17
Wu Min, Que Yuanlin, Yang Jian. Seasonal performances of soil capillary infiltration system on domestic wastewater. *Journal of University of Science and Technology of Suzhou (Engineering and Technology)*, **2008**, 21(1):13-17 (in Chinese)
- [17] 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. *Soil. Sci. Plant. Nutr.*, **2002**, 48(2):125-134