

文章编号:1000-582X(2008)06-0688-06

紫色土构建快渗系统对污水氮去除性能的影响

王春燕^{a,b}, 郭劲松^{a,b}, 王 飞^{a,b}, 唐 翌^a

(重庆大学 a. 三峡库区生态环境教育部重点实验室; b. 城市建设与环境工程学院, 重庆 400030)

摘 要:以三峡库区常见的紫色土和河砂为基本介质构建人工土层快速渗滤系统 (constructed rapid infiltration system, CRI)。试验采用土砂比为 2:1、3:1 和 4:1 的 3 组渗滤介质分别构建 1.5 m 厚土柱, 又用土砂比为 3:1 的同一渗滤介质构建 0.3、0.6、1.0、1.5 m 的 4 个不同厚度土柱, 分别进行生活污水氮去除性能的对比试验。结果表明: 1) 土砂比为 4:1 的渗滤介质构建的装置对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 及 TN 的去除效果相对较好, $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 去除率分别为 71.7% 和 48.8%, 接近纯紫色土柱的氮去除性能, 是较合适的渗滤介质; 2) 以库区紫色土构建的 CRI 装置, 0.6 m 以内的土层是污水中 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除的主要区域, 0.6~1.0 m 土层是 TN 去除主要区域, 土层厚度的增加不能确保装置氮去除性能的提高。以 1.0 m 土层厚度构建 CRI 系统处理生活污水在三峡库区较为适宜。

关键词:三峡库区; 人工土层快渗; 系统构建; 氮去除

中图分类号:X52

文献标志码:A

Influence study of constructed rapid infiltration system constructed by purple soil on sewage Nitrogen removal performance

WANG Chun-yan^{a,b}, GUO Jin-song^{a,b}, WANG Fei^{a,b}, TANG Yi^a

(a. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment of Ministry Education;

b. Faculty of Urban Construction and Environment Engineering,

Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: The nitrogen removal performance of a constructed rapid infiltration system (CRI) constructed using the common purple soil and sand from the Three Gorges Reservoir Region in the P. R. China was studied. In order to optimize the construction and the nitrogen removal performance of the CRI, three 1.5 m high columns were examined using mixed media with soil/sand ratios of 2:1, 3:1 and 4:1, respectively. Four soil columns with heights of 0.3, 0.6, 1.0, 1.5 meters subsequently were tested using media ratio of 3:1. It is shown that the CRI constructed by the medium of sand/soil ratio being 4:1 possesses better removal performance for the removal of $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ and TN. The removal rates for $\text{NH}_3\text{-N}$ and TN are 71.7% and 48.8% respectively, close to the nitrogen removal performance of unmixed purple soil. Hence the 4:1 medium of sand/soil ratio is appropriate. It is also shown that, when considering the functional area of CRI treating the sewage, the upper 0.6 m of CRI is the main area that removes COD and $\text{NH}_3\text{-N}$, whilst 0.6 m~1.0 m is the main area that removes TN. Increasing the soil layer thickness does not ensure better nitrogen removal performance. The 1.0 m soil layer thickness of a CRI system is appropriate for treating sewage in the Three Gorges Reservoir Region.

Key words: Three Gorges Reservoir Region; constructed rapid infiltration; system construction; Nitrogen removal

收稿日期:2008-01-15

基金项目:中国科学院西部行动计划资助项目(KZCX2-XB2-07-02);重庆市科技攻关重点资助项目(CSTC2007AB7023)

作者简介:王春燕(1971-),女,重庆大学博士研究生,主要从事水污染控制理论与技术研究。

郭劲松(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(Tel)023-65120768;(E-mail) guo0768@126.com。

人工土层快速渗滤系统 (constructed rapid infiltration system, CRI) 是一种污水土地处理方法,它利用土壤生态系统对污染物具有净化作用的原理,通过人为方式改变天然土壤的组成和土壤本身的环境条件,增加土壤的处理能力,强化土壤的净化功能,是对污水快速渗滤 (rapid infiltration, RI) 系统的改良。

氮是城镇污水的主要污染物,传统快渗理论认为:有机污染物的去除与氮氮的硝化具有相似的运行条件,在有机物去除最大化的同时能够保证有机氮的矿化和氨氮硝化反应的最大化,提高 TN 去除率的重要手段是延长落干时间^[1-3],间歇投配有利于硝化和反硝化作用的进行^[4]。在同样条件下,延长落干时间将导致系统水力负荷减少,增加用地面积。从减少用地角度出发,学者们针对快渗系统构建对氮去除性能的影响,进行了多方面研究。

崔理华等在北京分别以人工土壤 (碎石垫层 20 cm,砾质粗砂土滤层 100 cm) 和模拟人工土柱 (高 1.2 m 砾质细砂土和粗砂土) 处理城市污水,发现:对 TN 的去除率前者只有 32.3 %^[5],后者始终在 35 %~60 %之间^[6]。朱夕珍等在成都以草炭、砂和当地耕层土配成 80 cm 高人工土柱,并种植物考察系统的 N 去除效果,发现系统对 TN 的去除率只有 37.8 %^[7]。牟新民等在深圳以河流冲积砂和大理石砂构建 1.5 m 高渗滤介质处理被污染河水,发现系统对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果较好,对 TN 去除效果较差^[8]。刘英等在北京以粗砂、草炭、当地耕层土构建 1.0 m 高滤柱试验后认为,湿干比越小,干化时间越长,越有利于氮的去除^[9]。Lance 等在长 2.75 m,直径为 150 mm,未栽种植物的快渗土柱中投加经一级处理后的生活污水,得到装置对 N 的去除效果为 45.6 %^[10]。

人工快渗系统构建重要的原则是就地取材,因地制宜。本课题组以三峡库区常见的紫色土为基本介质,同时为了提高土层的渗透性,在紫色土中加入一定比例的渗滤性能良好的砂,以此混合基质构建 CRI 系统。发现:1:3 的湿干比和连续投配 1 d 是 CRI 装置在库区温暖季节 (春、夏、秋) 较合理的运行方式,此条件下,以总高 1.0 m 的纯紫色土柱构建的快渗系统处理生活污水,对 COD、SS 和 TP 去除效果满意,对库区的土壤和气候条件有较好的适应性^[11-12]。为了进一步考察利用土砂混合介质构建的 CRI 系统对生活污水中氮去除性能的影响,采用 3 组不同土砂比的渗滤介质和 4 组不同的土层厚度进行污水氮去除效果的对比试验,为寻求适宜于三峡库区土壤特性及气候条件的 CRI 系统构造参数提供依据。

1 试验方法和内容

1.1 试验安排及装置

试验将渗滤介质配比及土层厚度分别作为控制条件,采用图 1 所示装置。

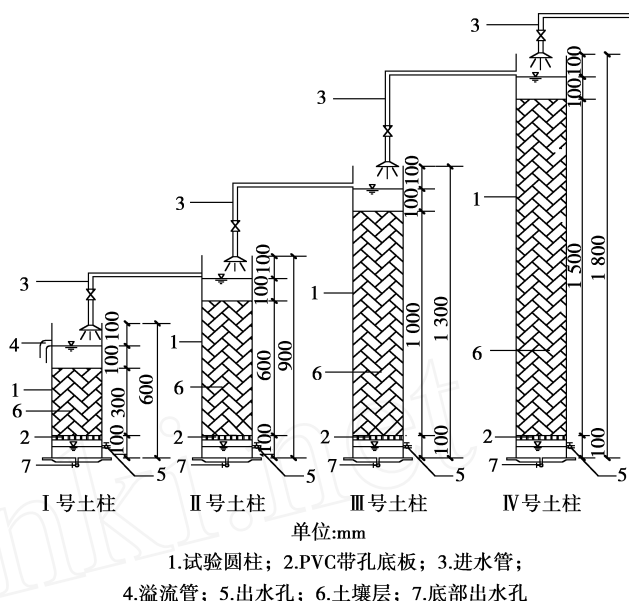


图1 CRI土柱试验装置

1) 渗滤介质配比试验:采用 3 种不同体积比的紫色土 (歌乐山) 与河砂 (嘉陵江) 的混合物作渗滤介质,分别填入 $\Phi 200$ mm, 1.5 m 深 PVC 管内,如图 1 中柱,待运行稳定,测定装置对污水的氮去除效果。

2) 土层厚度试验:采用土砂比为 3:1 (体积比) 的混合介质分别填入图 1 所示 $\Phi 200$ mm, 0.3、0.6、1.0、1.5 m 的 4 个土柱中,待运行稳定,测定不同土层厚度条件对氮的去除效果。

试验运行工况:淹没配水 1 d,湿干比 1 d 3 d^[13]。

1.2 试验流程

试验在重庆大学市政实验楼下进行,进水为学生宿舍生活污水。污水首先进入调节池,考虑到污水中的漂 (悬) 浮物可能造成土柱表面堵塞,影响复氧效果,在配水桶前设置过滤筛网对漂 (悬) 浮物进行拦截,然后试验用水经配水管分配至 CRI 土柱。试验流程如图 2 所示。

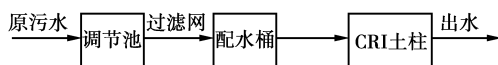


图2 试验流程图

1.3 测试项目及方法

COD:HACH-COD;NH₃-N:纳氏试剂分光光度法;NO₃-N:HACH 紫外分光光度法;TN:紫外分光光度法^[14]。

2 结果与分析

2.1 渗滤介质配比试验结果

以不同土砂比的渗滤介质装填 CRI 系统,装置稳定运行 4 周期的进出水 NH₃-N、NO₃-N、TN 浓度及其去除效果见图 3-5。此时,4 个周期进水中的 COD 浓度分别为 216、179、241 和 267 mg/L,3 组不同土砂配比介质构建的 CRI 装置中 COD 的出水浓度均在 60 mg/L 以下,效果满意;且随着土壤含量的增加,介质对 COD 的去除效果通常趋好。

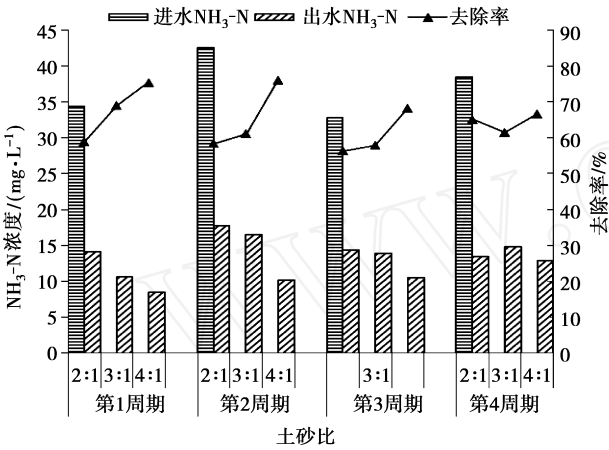


图 3 不同土砂比对 NH₃-N 的去除

从图 3 可知,同一进水条件下,土砂比 4 1 介质构建的 CRI 装置出水 NH₃-N 浓度始终低于其它 2 组介质,平均去除率为 71.7 %。

当介质土砂比为 2 1 和 3 1 时,平均去除率分别为 59.7 %和 62.4 %。土砂比 3 1 在前 3 次试验结果中,NH₃-N 去除率均略高于土砂混合 2 1 介质,仅最后一次出现土砂比 3 1 的 NH₃-N 去除率低于土砂比 2 1 的情况。总的来看,可以认为:土砂比较大的介质有利于污水中 NH₃-N 的去除。

如图 4 所示,3 组土砂混合介质的出水 NO₃-N 含量比进水都有增加,除第 3 周期外,其它 3 次数据结果显示:在同样的进水条件下,2 1 的土砂介质对凯氏氮的硝化最完全,出水中 NO₃-N 的含量最高,若以出水 NO₃-N 浓度来衡量,则土砂比为 4 1 的介质出水浓度最低,平均为 10.25 mg/L。

从图 5 可知,3 组介质出水 TN 浓度呈明显差异,随着土砂比增大,去除率有大幅度的提高。土砂

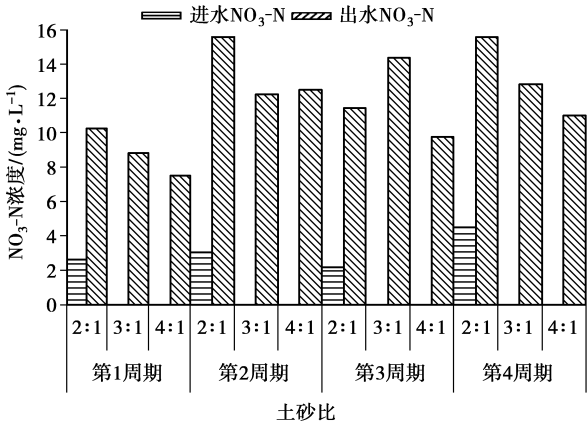


图 4 不同土砂比对 NO₃-N 的去除

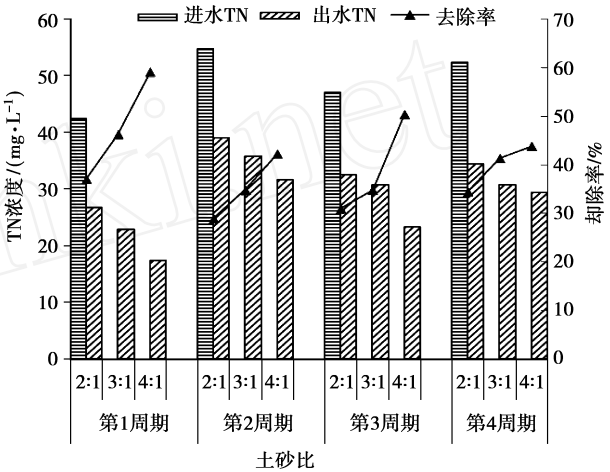


图 5 不同土砂比对 TN 的去除

比 4 1 介质的出水 TN 浓度均低于另外 2 组介质,平均去除率为 48.2 %,土砂比 3 1、2 1 的平均去除率分别为 39.3 %和 32.8 %。

2.2 土层厚度试验结果

不同土层厚度条件下 CRI 系统进出水 NH₃-N、NO₃-N、TN 浓度及其去除效果见图 6-8。此时进水中 COD 平均浓度为 230 mg/L,不同土层厚度下水 COD 平均浓度分别为 137、68、34 和 28 mg/L,平均去除率分别为:40.4 %、70.4 %、85.2 %和 87.8 %。

若将土柱 的去去除率看成是 100 %,则土柱 、 、 的相对去除量分别为 46.0 %、80.1 %和 97.0 %,说明在常见生活污水的有机物浓度范围内,0.6 m 土层基本完成对有机物的去除,土壤表层是有机物降解的主要部位。

从图 6 可以看出,在 1.0 m 土层厚度范围内,随着土层厚度的增加,NH₃-N 的去除率呈直线递增的态势,继 1.0 m 厚度之后,NH₃-N 去除率的递增减

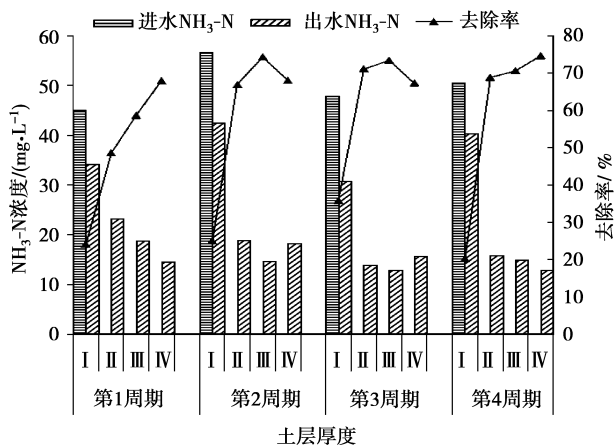


图 6 不同土层厚度对 NH₃-N 的去除

缓(如第 1、2 周期),甚至出现了不增反降的结果(如第 3、4 周期)。综观 4 个周期:进水 NH₃-N 的平均浓度为 48.8 mg/L,测得土柱 、 、 、 出水 NH₃-N 的平均浓度分别为 36.8、17.5、15.2 和 16.3 mg/L,去除率分别为 24.6%、64.1%、68.9% 和 66.6%,其中土柱 对 NH₃-N 去除率相对稍高。土柱 虽然较土柱 增加了 0.5 m 的土层厚度,但测得出水中 NH₃-N 的平均浓度反而有所升高,可以认为,超过 1.0 m 之后,土层厚度的增加对 NH₃-N 的去除没有明显效果。

若将土柱 的去除率看成是 100%,则土柱 和 的相对去除量分别占 35.7%和 93.0%,可以认为 0.6 m 的土层内去除了绝大部分的 NH₃-N。

图 7 所示,各土层厚度的出水 NO₃-N 含量比进水都有增加,同时,土层越厚,出水中 NO₃-N 的含量就越高,说明进水中的凯氏氮转化的 NO₃-N 越多。

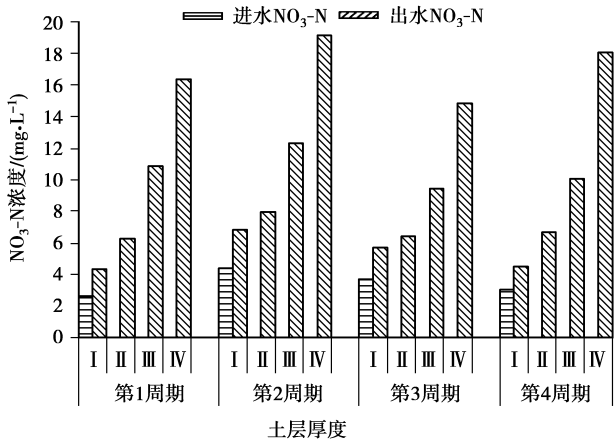


图 7 不同土层厚度对 NO₃-N 的去除

图 8 中,进水中的 TN 平均浓度为 64.6 mg/L,土柱 、 、 、 测得出水 TN 的平均浓度分别为

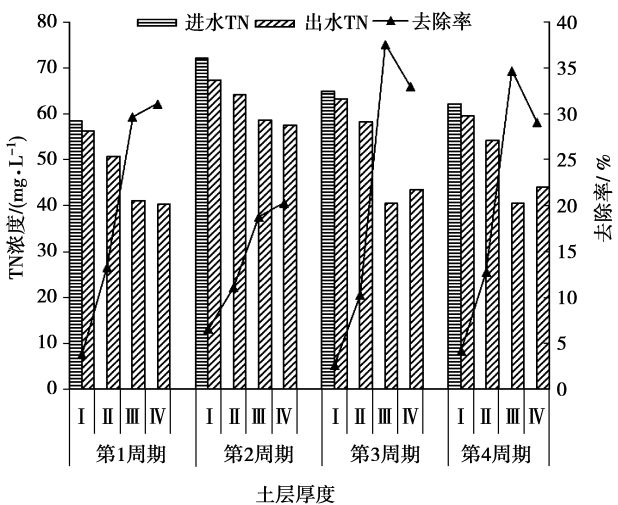


图 8 不同土层厚度对 TN 的去除

62.4、56.9、44.3、46.5 mg/L,去除率分别为 3.4%、11.9%、31.4%、27.4%。表明:3 1 的土砂混合介质构成的土柱对 TN 的去除效果并不理想,高度为 1.0 m 的土柱 对 TN 去除率是 4 个装置中相对最高的。

同样,若将土柱 的去除率看成是 100%,则土柱 和 的相对去除量分别占 10.8%和 38.0%,可以认为 0.6~1.0 m 的土层是 TN 去除最重要的区域。

3 讨 论

紫色土与河砂的混合,是利用河砂的高渗透性提高 CRI 系统的水力负荷,同时利用紫色土的土壤生态系统进行污水的净化处理。

从有机物的去除来看,除河砂外,上述所有介质均能满足去除要求,介质含土量越大,对氨氮和总氮的去除效果越好,同一湿干比条件下,土砂比为 4 1 的渗滤介质对氨氮和总氮的去除已接近纯紫色土水平。

三峡库区广泛分布的紫色土是库区重要的种植土壤,将紫色土、不同土砂配比的介质及河砂进行 24 h 的清水渗滤试验^[11],测得渗滤系数如表 3。

表 3 介质清水 24 h 平均渗滤系数

介质 (体积比)	平均渗滤 系数/(m·s ⁻¹)	平均渗滤系数相对值 (与紫色土相比)
河砂	8.32 × 10 ⁻⁵	9.4
土 砂 = 2 1	1.94 × 10 ⁻⁵	2.2
土 砂 = 3 1	1.84 × 10 ⁻⁵	2.1
土 砂 = 4 1	1.70 × 10 ⁻⁵	1.9
紫色土	8.86 × 10 ⁻⁶	1.0

从表 3 可以看出:土砂比为 4:1 时的介质其渗滤系数接近紫色土的 2 倍,也即同等条件下,采用土砂比为 4:1 时的渗滤介质代替纯紫色土充填快渗系统能够在接近纯紫色土氮去除效果的情况下,节省近一半的滤池占地^[11],具有可观的经济效益,是较合适的介质选择。

CRI 装置出水中增加的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 来自凯氏氮的氧化。污水中的有机氮转化生成的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 越多,在好氧作用充分的情况下, $\text{NH}_3\text{-N}$ 被氧化形成的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 就越多,由于 $\text{NO}_3\text{-N}$ 带负电荷,与土壤粘粒的负电荷相互排斥,易随水流走,因此,同样条件下, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率大的土柱其出水中应有较多 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的生成,但实验发现:土砂比较大的土柱,对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 及 TN 都具有相对高的去除效果,其中纯土柱的氮去除效果最好^[12]。

分析认为,上述结果除受系统运行及环境等条件影响外,主要与紫色土本身的性质有关。库区紫色土含少量砂粒和较多的粘粒,团粒结构松散,有机物含量较少^[15]。

土壤粘粒越多,可交换的阳离子(CEC)含量越多,土壤对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 及其中间产物的吸附作用就越强,有利于 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的氧化和去除;另一方面,较多的粘粒使土壤微团持水性好,土层内能保持相对长时间的厌氧状态,有利于反硝化的进行和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TN 的去除。土层内的有机质含量是反硝化作用进行的必要条件,有机物含量不充分会对反硝化过程产生一定的影响,这在后续的土层厚度试验中也得到了印证。此外,土壤中微生物的数量和生存状态也影响着系统对氮的去除效果。

在土层厚度试验中,综合 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 及 TN 在不同土层厚度中的去除情况,认为: $\text{NH}_3\text{-N}$ 的氧化主要产生在 0.6 m 土层内,TN 的去除则主要发生在 0.6~1.0 m 的土层内,1.0 m 之后的土层对 TN 去除效果不大,甚至出现 TN 浓度反而增加的现象。

$\text{NO}_3\text{-N}$ 的出水浓度随土层厚度增加而增加的事实,说明本装置在湿干比为 1:3 的自然复氧条件下,能够保证土层中良好的好氧条件。随着土层厚度的增加, $\text{NH}_3\text{-N}$ 总是不断地被氧化成 $\text{NO}_2\text{-N}$ 类中间产物以及 $\text{NO}_3\text{-N}$,同时由于土壤粘粒带有负电荷,与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 同性相斥的结果,使 $\text{NO}_3\text{-N}$ 不断地沿程累积,从出水中流出。

就 TN 而言,土柱 的 TN 去除效果优于土柱,是因为在 1.0 m 土层内 COD 转化去除后,剩余碳源不够提供 1.0~1.5 m 土层硝态氮的反硝化作

用(本试验中,高达 97% 的污水中的有机物在土柱 1.0 m 以上已被矿化,土砂比为 1:3 的渗滤介质中含有的有机物不多),在最后 0.5 m 土层内生物反硝化作用不充分,TN 未能得以进一步去除,同时 $\text{NO}_2\text{-N}$ 类 $\text{NH}_3\text{-N}$ 氧化的中间产物还在进一步的硝化中,造成 TN 浓度的升高。

试验结果说明:一定的土层厚度是氮去除的必要条件,但仅仅依靠加深渗滤介质厚度不一定能达到提高 CRI 装置氮去除效果的目的。

4 结 论

1)对库区紫色土而言,渗滤介质中土壤含量越多,越利于 CRI 系统的氮去除性能,但渗透系数变小后直接导致系统水力负荷的减少。因此构建 CRI 装置时需要综合考虑污水原水水质及水力负荷的要求,以寻求恰当的人工渗滤介质。

2)采用土砂比 4:1 的渗滤介质构建 CRI 装置,对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 及 TN 的去除效果相对较好,其中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 去除率分别为 71.7% 和 48.8%,接近同一试验条件下纯紫色土柱的氮去除水平,而其水力负荷接近纯土柱的 2 倍,是较合适的渗滤介质。

3)以三峡库区紫色土构建的 CRI 装置,在 0.6 m 以内的土层是污水中有机物和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除最重要的区域;0.6~1.0 m 土层是 TN 去除的主要区域;土层厚度的增加不能确保装置脱氮性能的提高。以 1.0 m 土层厚度构建 CRI 系统处理生活污水在三峡库区较为适宜。

参考文献:

- [1] USEPA. Process design manual for land treatment of municipal wastewater [M]. Cincinnati, Ohio, USA: Environment Protection Agency, EPA625/1-81-013, 1981.
- [2] MATSUMOTO R M. Abiotic nitrogen removal mechanisms in rapid infiltration wastewater treatment [R/OL]. Escholarship Repository, University of California, Riverside, USA: [s. n.], 2004 [2004-07-01] <http://repositories.cdlib.org/wrc/tcr/matsumoto/>.
- [3] GÜNGÖR K, ÜNLÜ K. Nitrite and nitrate removal efficiencies of soil aquifer treatment columns [J]. Turkish Journal of Engineering and Environmental Science, 2005, 29: 159-170.
- [4] BEGGS R A, TCHOBANOGLOUS G, HILLS D, et al. Modeling subsurface drip application of onsite wastewater treatment system effluent[C]. Conference Proceedings of

- On-Site Wastewater Treatment X, Sacramento, California, USA: March 2004. Sacramento, California, USA: ASAE Publication Number 701P0104, 2004:92-103.
- [5] 崔理华,朱夕珍,李国学,等.北京西郊城市污水人工快滤处理与利用系统[J].中国环境科学,2000,20(1):45-48.
- CUI L F HUA, ZHU X F ZHEN, LI GUO-XUE, et al. Artificial soil rapid infiltration system for treating municipal wastewater in the west of Beijing [J]. China Environment Science, 2000, 20(1):45-48.
- [6] 崔理华,朱夕珍,李金铃,等.城市污水人工土快滤处理系统的进水水质条件研究[J].农业环境保护,2002,21(3):228-231.
- CUI L F HUA, ZHU X F ZHEN, LI JIN-LING, et al. Influent quality of rapid infiltration system using Artificial soil for treating municipal wastewater [J]. Agro-environmental Protection, 2002, 21(3):228-231.
- [7] 朱夕珍,肖乡,刘怡,等.植物在城市生活污水人工土快滤处理床的作用[J].农业环境科学学报,2003,22(5):582-584.
- ZHU X F ZHEN, XIAO XIANG, LIU YI, et al. Role of plants in a rapid infiltration filter mode of Artificial soil for treating municipal sewage [J]. Journal of Agro-environmental Science, 2003, 22(5):582-584.
- [8] 牟新民,黄培鸿,张金炳,等.人工快速渗滤系统处理深圳市茅洲河水的试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2003,11(4):370-376.
- MU XIN-MING, HUANG PEI-HONG, ZHANG JIN-BING, et al. A on-site experimental study on the treatment of maozhou river water by constructed rapid infiltration system in shenzhen [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2003, 11(4):370-376.
- [9] 刘英,李国学,崔理华.不同配水周期人工土快滤系统对城市污水的净化效果[J].农业环境保护,2000,19(6):332-335.
- LIU YING, LI GUO-XUE, CHUI L F HUA. Purification Effect of a rapid infiltration system using artificial soil with different irrigating period on treatment of municipal sewage [J]. Agro-environmental Protection, 2000, 19(6):332-335.
- [10] LANCE J C, RICE R C, GILBERT R G. Renovation of wastewater by soil columns flooded with primary effluent [J]. Journal of the Water Pollution Control Federation, 1980, 52(2):381-388.
- [11] 郭劲松,王春燕,方芳,等.人工快渗系统在三峡库区处理生活污水的适应性研究[J].环境科学,2006,27(11):2327-2332.
- GUO JIN-SONG, WANG CHUN-YAN, FANG FANG, et al. Applicability study of CRI treating sewage in the Three-Gorges Reservoir Region [J]. Environmental Science, 2006, 27(11):2327-2332.
- [12] 郭劲松,王春燕,殷亮,等.湿干比对人工快渗系统除污性能的影响[J].中国给水排水,2006,22(17):9-12.
- GUO JIN-SONG, WANG CHUN-YAN, YIN LIANG, et al. Influence of wet/dry ratio on pollutants removal performance by rapid infiltration system [J]. China Water and Wastewater, 2006, 22(17):9-12.
- [13] 王春燕,郭劲松,姚若虚,等.三峡地区人工土层快渗系统处理生活污水的试验[J].重庆大学学报:自然科学版,2006,29(11):132-136.
- WANG CHUN-YAN, GUO JIN-SONG, YAO RUO-XU, et al. Performance study of constructed rapid infiltration in Three-Gorges Reservoir Region [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006, 29(11):132-136.
- [14] 国家环保局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- EPA of the PRC. Survey and analyse methods for water and sewage [M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Environmental Science of PRC, 2002.
- [15] 钟远平,唐将,王力.三峡库区土壤有机质区域分布及影响因素[J].水土保持学报,2006,20(5):73-76.
- ZHONG YUAN-PING, TANG JIANG, WANG LI. Distribution characteristic of soil organic Carbon in three gorges reservoir district [J]. Journal of soil and water conservation, 2006, 20(5):73-76.

(编辑 张 苹)