文章编号:1672-3031(2021)05-0499-07

改良型人工快渗系统脱氮除磷效果研究

张杰斌[1]，朱木兰[1,2]
（1. 厦门理工学院 环境科学与工程学院，福建 厦门 361024；2.厦门理工学院 水资源环境研究所，福建 厦门 361024）

摘要： 人工快渗(CRI)系统是一种广为人知的无动力生态处理技术措施，但传统CRI系统存在对氮、磷去除率普遍较低的问题。本研究采用海绵铁、沸石、火山岩、红壤土和杂沙作为填料，构建了一个改良型CRI系统，在水力负荷为1 $m^3/(m^3\cdot d)$的条件下，以实际生活污水为试验进水，进行为期20天的试验。实验结果表明，该系统在运行16天后出水TP、TN和NH_3-N浓度均趋于稳定，稳定后出水平均浓度分别为0.21 mg/L、8.38 mg/L和2.34 mg/L，能分别满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)一级A排放标准的0.5 mg/L、15 mg/L和5 mg/L的限值。TP、TN和NH_3-N三项指标的总平均去除率为84.44%，远高于传统CRI系统的44.06%总平均去除率。该研究成果为治理农村生活污水提供了一项行之有效的生态治理技术措施。

关键词： 人工快渗系统；生态治理；农村生活污水；脱氮除磷；出水水质
中图分类号： TU991.2 **文献标识码：** A **doi：** 10.13244/j.cnki.jiwhr.20200125

1 研究背景

近年来，农村生活污水排放量逐年增加，但多数农村缺乏生活污水处理设施，生活污水未经处理直接排放，由于生活污水中含有大量引起水体富营养化的氮、磷，从而影响地表水环境[1]。因此，当前亟需解决农村生活污水处理问题，特别是氮磷去除问题。2019年7月水利部等九部门联合印发了《关于推进农村生活污水治理的指导意见》，意见要求按照因地制宜、利用为先、就地就近、生态循环等基本思路进行农村生活污水处理。人工快渗(Constructed Rapid Infiltration，CRI)系统是一种广为人知、应用较多的无动力生态污水处理技术。CRI系统是在土壤渗滤系统的基础上发展起来的，其以天然河砂、砾石等渗透性能较好的渗滤介质代替天然土层，具有建设成本低、操作简单、运行管理方便、出水水质好等优点，比较适合于农村生活污水处理[2]。但是，目前仍存在CRI系统对总氮(TN)、总磷(TP)和氨氮(NH_3-N)去除效果不理想的短板。

马利民等[3]采用天然河砂和耕土构建CRI模型柱，在湿干比为1∶6的条件下，对5种水力负荷(0.2、0.7、1.2、1.5、2.0 m/d)进行试验，实验结果表明，在水力负荷为1.2 m/d时，对TP和TN的平均去除率最大，分别为35.50%和59.50%。陈永杏等[4]采用体积比为土壤∶石英砂=3∶1的结构构建CRI系统，在湿干比为1∶3的条件下，以昌平污水处理中心的污水作为试验用水，实验结果表明，对TP的最高去除率为54.86%。何腾兵等[5]采用粒径为0.9 mm的大理石砂和河砂作为填料构架CRI系统，在水力负荷为1.08 m/d的条件下，以百花村生活污水作为试验用水，实验结果表明，对TP的平均去除率为65.50%。陈杨武等[6]研究表明，以河砂填料层和砾石填料层构建CRI系统，在水力负荷为1 m/d的条件下，对TP的平均去除率为49.40%。张金炳等[7]以天然河砂作为填料介质构建CRI系统，在水力负荷为1 m/d的条件下处理生活污水，对TP和TN的平均去除率分别为67.80%和28.93%。崔理华等[8]研究表明，CRI系统由碎石和土壤构成，在湿干比为1∶8的条件下进行试验，对

收稿日期：2020-07-10；网络首发时间：2021-04-29
网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20210428.0929.001.html
基金项目：福建省科技计划项目(2019I0021)
作者简介：张杰斌(1997-)，硕士生，主要从事农村污水治理研究。E-mail：86254420@qq.com
通讯作者：朱木兰(1967-)，博士，教授，主要从事农村污水治理与海绵城市建设技术研究。E-mail：292890310@qq.com

TN的平均去除率为32.30%。平玉焕等[9]研究表明，通过采用天然河砂和沸石这2种填料构建CRI系统模拟柱，在水力负荷为1 m/d的条件下进行试验，实验结果表明，NH_3-N的去除率稳定在32.15% ~ 42.49%。

综上所述，以砂土、砾石为主要填料的传统CRI系统对TP的去除率约为35.50% ~ 67.80%，TN的去除率约为28.93% ~ 59.50%，NH_3-N的去除率约为32.15% ~ 42.49%。平均而言，对TP、TN和NH_3-N的平均去除率仅约为54.61%、40.24%和37.32%。可见，传统CRI系统对TP、TN和NH_3-N的去除率普遍存在偏低的问题，也因此采用CRI系统治理农村生活污水时，通常氮磷水质指标难以达到一级A排放标准。为了提高CRI系统对氮磷的去除率，本研究在传统的沙土填料中加入了火山岩、沸石、海绵铁等对水质净化效果较好的填料，构建了一个改良型CRI系统，并开展其对TP、TN和NH_3-N的去除效果研究，旨在呼应水利部2019年的文件精神，为治理农村生活污水提供一项更为行之有效的生态治理技术措施。

2 改良型CRI系统试验

2.1 改良型CRI系统 本研究所构建的改良型CRI系统总厚度为100 cm。其结构由上到下分别为覆盖层、人工改良土壤层、细过渡层、粗过渡层和排水层。覆盖层由粒径为4 ~ 8 mm的沸石组成，厚度为10 cm；人工改良土壤层由质量比为红壤土∶杂沙∶沸石∶海绵铁∶火山岩=2∶3∶2∶2∶1的5种填料均匀混拌而成，厚度为60 cm，该填料层的渗透系数为0.169 cm/s，其中杂沙粒径为0.05 ~ 2 mm，沸石粒径为3 ~ 5 mm，海绵铁粒径为1 ~ 3 mm，火山岩粒径为3 ~ 5 mm；细过渡层由粒径为3 ~ 5 mm的火山岩组成，厚度为10 cm；粗过渡层由粒径为5 ~ 8 mm的火山岩组成，厚度为10 cm；排水层由粒径为8 ~ 16 mm的火山岩组成，厚度为10 cm。改良型CRI系统填料方案如表1所示。

表1 改良型CRI系统填料方案

层(由上往下)	名称	层厚/cm	填料	质量比/%
1	覆盖层	10	沸石(4~8mm)	100
2	人工改良土壤层	60	红壤土	20
			杂沙(0.05~2mm)	30
			沸石(3~5mm)	20
			海绵铁(1~3mm)	20
			火山岩(3~5mm)	10
3	细过渡层	10	火山岩(3~5mm)	100
4	粗过渡层	10	火山岩(5~8mm)	100
5	排水层	10	火山岩(8~16mm)	100

注：总厚度为100cm。

试验装置柱高130 cm，内径为10 cm，外径为11 cm。在此装置中由下到上按照表1所示的各层填料和层厚逐层填入填料，填料总厚度为100 cm，由此构建起一个改良型CRI系统试验柱，该试验柱示意图如图1所示，其结构由上到下分别为覆盖层、人工改良土壤层、细过渡层、粗过渡层和排水层。在实际应用中覆盖层既有水质净化作用又有保护人工改良土壤层中的填料不受雨水冲刷而流失的作用；人工改良土壤层的作用是提高改良型CRI系统对TP、TN和NH_3-N的去除效果；细过渡层和粗过渡层的作用是防止人工改良土壤层中的填料随着渗滤水掉落至排水层；排水层的作用是将渗滤水快速排出。

2.2 试验方法 (1)试验进水。试验进水采用从污水排放口所收集到的实际生活污水。在水力负荷为1 $m^3/(m^3 \cdot d)$的条件下，进行为期20天的试验。试验期间，每日设置3个时间点布水，为早上9∶00、中午13∶00和晚上18∶00，每个时间点布水1小时，即每天布水3小时，落干21小时，湿干比为1∶7。由式

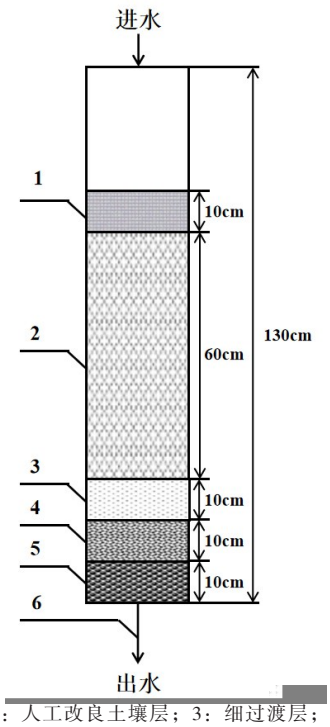
(1)可计算出该改良型CRI系统试验柱的填料总体积为7.85×10^{-3} m^3，本试验的水力负荷为1 $m^3/(m^3\cdot d)$（即每立方米的填料每日处理1立方米的污水），由式(2)可计算出日进水量为7.85 L。根据农村污水排放主要集中在早、中、晚三个时间段，且排水量通常情况是：早上＜中午＜晚上，故本试验将进水分配在早上9:00、中午13:00、晚上18:00三个时间点，进水量分别设定为2 L、2.5 L和3.35 L。

$$V=\pi r^2 h \tag{1}$$

式中：V为改良型CRI系统试验柱填料总体积，cm^3；r为试验柱内半径5 cm；h为填料总厚度100 cm。

$$Q=HLR\cdot V\cdot T \tag{2}$$

式中：Q为改良型CRI系统试验柱日进水量，cm^3；HLR（Hydraulic Loading Rate）为水力负荷1 $m^3/(m^3\cdot d)$；V为填料总体积7.85×10^{-3} m^3；T为时间1 d。



（1：覆盖层；2：人工改良土壤层；3：细过渡层；4：粗过渡层；5：排水层；6：取样口）

图1　改良型CRI系统试验柱示意图

(2)出水检测。试验期间，试验进水通过人工取样的方式取自厦门理工学院宿舍区生活污水排放口，改良型CRI系统试验柱出口设有出水管，将出水管排出的水进行收集，并取部分水样用于水质检测。从第2天开始对CRI系统试验柱进、出水水样的TN、TP和NH_3-N指标进行检测，且每隔1天进行一次检测。TP采用钼锑抗分光光度法测定，标准为GB 11893-891，检测仪器为(V8版)5B-3C型连华多水质参数测定仪；TN采用非色散红外检测法，标准为GB11894-89，检测仪器为TOC-VCPH总碳和总氮测定仪；NH_3-N采用纳氏试剂分光光度法测定，标准为HJ535-2009，检测仪器为(V8版)5B-3C型连华多水质参数测定仪。

3　结果与分析

3.1　TP的结果与分析　在为期20天的试验期间，该改良型CRI系统进、出水TP浓度分别为1.02～1.32 mg/L和0.09～0.22 mg/L，进、出水TP浓度变化情况如图2所示。由图2可知，改良型CRI系统进水TP浓度变化幅度较大，主要原因是生活污水排放口的污水为流动状态，每日试验进水现取现用，实际生活污水的TP存在一定的波动性。试验从一开始至第14天，出水TP浓度呈现缓慢上升的趋势；第14～20天，进水TP浓度虽然波动于1.18～1.40 mg/L之间，但出水TP浓度基本趋于稳定，可见该系统具有一定的耐冲击负荷性，与刘操的研究结果[10]相符合。该CRI系统运行达到稳定后，进、出水TP的平均浓度分别为1.28 mg/L和0.21 mg/L，TP去除率为83.95%。出水的TP浓度完全满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)一级A排放标准的0.5 mg/L限值。

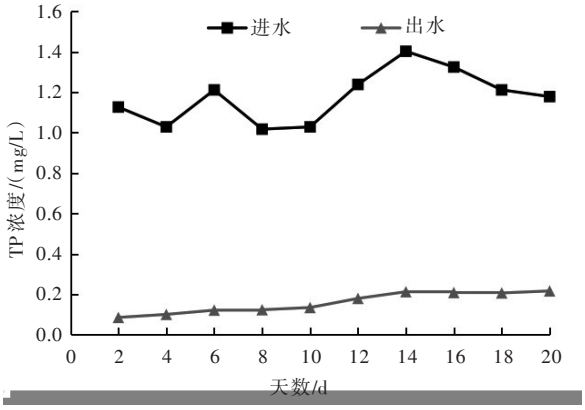


图2　改良型CRI系统进出水TP浓度变化

CRI系统除磷方式主要是通过填料的吸附作用、沉淀作用、化学反应以及微生物降解。本文所构建的改良型CRI系统运行达到稳定后，对

TP的平均去除率为83.95%，与传统CRI系统的54.61%平均去除率相比，该系统的TP的平均去除率提高了29.34%，其原因主要与人工改良土壤层中的红壤土和海绵铁有关。(1)红壤土作为厦门市本地土壤，呈偏酸性[11]，甘海华等[12]研究表明红壤土对磷素的吸附可达到0.73 mg/g，冯萃敏等[13]研究表明红壤土中含有无定形态的铁铝氧化物，其与水体中的磷反应生成难溶解状态的A1-P和Fe-P，可起到强化除磷的效果；(2)海绵铁作为一种新型的水处理材料，主要成分为铁氧化物，具有比表面积较大、物理吸附、絮凝沉淀等优点，主要依靠吸附作用、化学作用和微生物降解对TP起到较好的去除性能[14]。万正芬等[15]研究表明海绵铁对磷具有较强的吸附能力，对磷理论饱和吸附量为0.49 mg/g。高照琴等[16]研究表明土壤中有机磷经过磷酸酶矿化后，转化成磷酸根(PO_4^{3-})。万琼等[1,17]研究表明海绵铁还有较强的化学反应能力，在含有偏酸性的环境中产生[H]和Fe^{2+}，而Fe^{2+}进一步氧化成Fe^{3+}，污水中的磷酸根可与Fe^{3+}生成较难溶的磷酸铁沉淀，达到除磷的效果。杨亮亮等[18]采用海绵铁的快速滤柱净化营养物质浓度较高的景观水，研究表明海绵铁对PO_4^{3-}-P的去除率达到96.2%。李杰等[19]研究表明海绵铁中存在铁与微生物之间构成的协同互促除磷机制。任杰等[20]研究表明海绵铁对除磷效果的提高是基于海绵铁缓慢的Fe^{2+}释放，推动了系统对微生物的筛选与促进了优先菌的规模性成长，随后持续性发生生化和化学作用的协同对TP强化降解。该CRI系统中磷酸盐的形成和沉积主要发生在人工改良土壤层，在实际应用中可通过在人工改良土壤层中种植耐涝耐肥的植物，及时将该层所生成的磷酸盐吸收并转移到植物的茎叶花，使得系统以平衡状态长期可持续地运行。刘玉春等[21]研究了5种植物对校园生活污水的净化效果，结果显示香蒲具有较好的脱氮除磷效果，对TN和TP的去除率分别达到83%和85%。马井泉等[22]试验了3种植物对城市富营养化河流中氮磷的去除效果，得出苦草的脱氮除磷效果最佳，对TN、NH3-N和TP的去除率分别为90.7%、97%和98%。

3.2 TN的结果与分析 试验运行期间，改良型CRI系统进、出水TN浓度分别为59.22 ~ 67.25 mg/L和5.69 ~ 15.83 mg/L，图3为进、出水TN浓度的变化情况。由图3可知，该CRI系统进水TN浓度曲线相较进水TP浓度曲线变化幅度较小，出水TN浓度曲线呈“先下降，后平稳”。试验运行第2 ~ 4天，出水TN浓度迅速下降，运行第4 ~ 10天，出水TN浓度缓慢增加。运行第10天开始至试验结束，出水TN浓度的变化趋势与出水TP浓度类似，尽管进水TN浓度波动于58.42 ~ 63.14 mg/L之间，但出水TN浓度呈现基本稳定状态。该CRI系统运行稳定后出水TN的进、出水平均浓度分别为60.93 mg/L和8.38 mg/L，对TN的平均去除率达到86.25%。出水TN浓度完全满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)一级A排放标准的15 mg/L的限值。

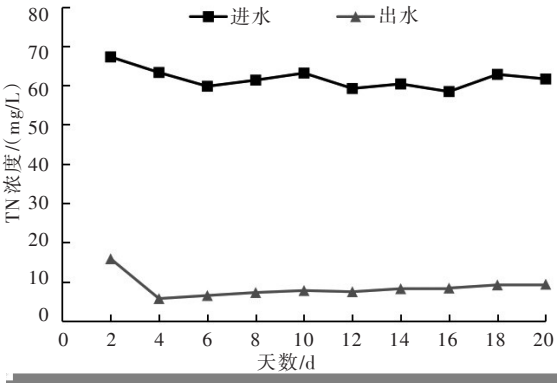


图3 改良型CRI系统进出水TN浓度变化

TN的去除是物理化学吸附、微生物硝化-反硝化和厌氧氨氧化共同作用的结果，在土壤微生物中的亚硝化细菌和硝化细菌的作用下将有机氮和氨态氮转化成硝态氮，接着反硝化细菌利用进水中的有机质进行反硝化脱氮，转化成氮气，同时厌氧氨氧化细菌也起到脱氮作用[23-25]。试验第2 ~ 4天，出水TN浓度迅速下降，而后逐渐趋于稳定，其原因是：(1)一开始系统填料较干燥，吸附力强，故对TN去除性能较好；(2)之后，填料的吸附力趋于稳定，系统中硝化和反硝化细菌等微生物

逐渐生长完全，数量随着试验运行逐渐增多而后趋于稳定，硝化和反硝化反应也趋于稳定。从前述可知，该改良型CRI系统对TN的平均去除率达到86.25%，相较于TN平均去除率为40.24%的传统CRI系统，该系统的TN平均去除率提高了46.01%。究其原因，主要与改良型CRI系统的沸石、杂沙、湿干比以及填料结构有关。(1)沸石表面不均匀，呈多孔结构，孔隙度较高，具有较大的比表面积，利于硝化细菌和反硝化菌生长和繁殖，从而提高对TN的去除效果[26]；(2)杂沙由细小的沙子和一些小溪里的杂质所构成，虽然没有中沙或者普通的沙子干净，但其对水质中的TN能起到一定的降解作用，何洁等[27]研究表明杂沙对TN的降解速率常数为0.0216/d；(3)试验过程中，湿干比为1∶7，落干期长于布水期，复氧效率较高，因此在落干期好氧微生物活性高，硝化反应顺利进行；(4)该CRI系统填料结构自上到下的粒径呈“粗-细-粗”，有利于上层覆盖层形成好氧层，下层人工改良土壤层形成兼氧厌氧层，从而有利于硝化与反硝化。

3.3 NH_3-N的结果与分析 试验运行过程中，改良型CRI系统进、出水NH_3-N浓度分别为12.57～15.20 mg/L和0.99～2.52 mg/L，图4为进、出水NH_3-N浓度的变化情况。由图4可知，该改良型CRI系统的出水NH_3-N浓度曲线趋势与出水TN浓度曲线相似。运行第2～4天，出水NH_3-N浓度呈下降趋势，这主要与填料的吸附和微生物的降解有关；第4～16天，出水NH_3-N浓度缓慢上升；第16～20天，虽然进水NH_3-N浓度波动于13.67～14.10 mg/L之间，但出水NH_3-N浓度基本保持稳定，趋于稳定后进、出水NH_3-N平均浓度分别为13.89 mg/L和2.34 mg/L，对NH_3-N的平均去除率为83.13%。出水的NH_3-N浓度完全满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)一级A标准的5 mg/L的限值。

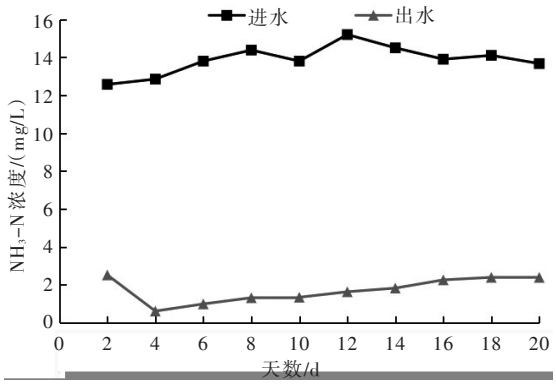


图4 改良型CRI系统进出水NH_3-N浓度变化

CRI系统通过填料吸附、硝化与反硝化作用等途径去除和转化污水中的NH_3-N，主要是通过好氧带硝化细菌的硝化作用将NH_3-N转化为NO_3-N，继而在厌氧带反硝化细菌的反硝化作用下将NO_3-N转化为N_2O和N_2等，最终NH_3-N得以去除[28]。从前述可知，该改良型CRI系统对NH_3-N的平均去除率为83.13%，相比于传统CRI系统的37.32%平均去除率，该系统的NH_3-N平均去除率提高了45.81%。究其原因：(1)首先，CRI系统中含有大量的好氧菌、厌氧菌等，微生物在NH_3-N的硝化、反硝化作用中发挥了至关重要的作用，有机物降解和氮的转化均是在微生物的作用下完成[29]；(2)其次，覆盖层和人工改良土壤层中含有沸石，沸石呈骨架状且多孔的结构，包含碱金属和碱土金属阳离子，例如Na^+、K^+、Ca^{2+}和Mg^{2+}，陆风海等[30]研究表明这些阳离子可与水中的NH_4^+进行离子交换，沸石的多孔结构和离子交换特性决定了其对污水中NH_4^+的吸附作用包括物理吸附和离子交换；(3)此外，沸石表面的多孔结构促使微生物附着生长，且改良型CRI系统覆盖层的大粒径填料有利于形成好氧层，从而有利于硝化反应的进行。杨永愿等[31]研究表明沸石的优势菌种为变形菌门(Proteobacteria)和拟杆菌门(Bacteroidetes)。Proteobacteria是与硝化作用密切相关的菌门，在系统长期运行下得到增殖，这与本试验具有较强的硝化作用相一致；Bacteroidetes被认为是以硝化细菌的代谢产物作为有机碳源的潜在异养型微生物，这种异养型微生物有利于维持微生物系统的稳定[32-33]；(4)最后，细、

粗过渡层和排水层由火山岩组成，其表面呈多孔、不规则结构，利于硝化细菌和反硝化细菌的生长，朱龙龙等[34]研究表明火山岩对NH_3-N表现出较好的净化性能，郝晓地等[35]研究表明火山岩对COD与BOD_5净化效果好，因此火山岩的加入不仅可以提高对NH_3-N的去除率，还可提高对有机污染物的去除率，即有利于提高整体的出水水质。

4 结论

本研究构建了一个改良型CRI系统，其由覆盖层、人工改良土壤层、细过渡层、粗过渡层和排水层组成。与传统CRI系统相比，本研究加入了火山岩、沸石、海绵铁等对水质净化效果较好的填料，对TP、TN和NH_3-N的去除效果有了显著的提升。主要结论如下：

(1)该改良型CRI系统运行至14天开始，系统出水TP浓度趋于稳定。达到稳定后，进、出水TP的平均浓度分别为1.28 mg/L和0.21 mg/L，TP平均去除率为83.95%。相较于传统CRI系统的54.61%的TP平均去除率，该系统的TP平均去除率提高了29.34%，其原因主要与人工改良土壤层中的红壤土和海绵铁有关。

(2)运行至10天开始，系统出水TN浓度趋于稳定。达到稳定后，进、出水TN的平均浓度分别为60.93 mg/L和8.38 mg/L，TN平均去除率为86.25%。相较于传统CRI系统的40.24%的TN平均去除率，该系统的TN平均去除率提高了46.01%，主要与改良型CRI系统的沸石、杂沙、湿干比以及填料结构有关。

(3)运行至16天开始，系统出水NH_3-N浓度趋于稳定。达到稳定后，进、出水NH_3-N的平均浓度分别为13.89 mg/L和2.34 mg/L，NH_3-N平均去除率为83.13%。相较于传统CRI系统的37.32%的NH_3-N平均去除率，该系统的NH_3-N平均去除率提高了45.81%，主要与改良型CRI系统中的沸石和火山岩有关。

综上，本文所构建的改良型CRI系统在运行16天后出水TP、TN和NH_3-N浓度均能趋于稳定，故本研究所采用的20天试验时长已能揭示该改良型CRI系统的运行效果。系统运行稳定后，TP、TN和NH_3-N三项指标的总平均去除率为84.44%，与传统CRI系统的44.06%总平均去除率相比，该系统的总平均去除率高出了44.38%。出水TP、TN和NH_3-N的浓度均能分别满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)一级A排放标准的0.5 mg/L、15 mg/L和5 mg/L的限值。

参 考 文 献：

[1] 宋志晓，张焕祯，王智丽，等．强化人工快速渗滤系统处理生活污水[J]．环境工程学报，2016，10(7)：3491-3495．

[2] 刘光英，张焕祯，张鑫，等．人工快速渗滤系统去除总氮技术进展[J]．工业水处理，2013，33(3)：1-4．

[3] 马利民，刘丛，崔程颖，等．人工土地快速渗滤系统处理城镇污水工艺优化[J]．水处理技术，2008(6)：47-51．

[4] 陈永杏，董红敏，尚斌，等．人工快速渗滤法处理小城镇污水的模拟试验研究[J]．生态环境学报，2011，20(2)：327-331．

[5] 何腾兵，李正昱，杨小毛，等．人工快速渗滤系统的工程应用[J]．环境工程，2005(3)：76-78．

[6] 陈杨武，秦燕，胡爽，等．人工快渗工艺对冬季生活污水处理诊断分析[J]．环境工程学报，2016，10(9)：4927-4932．

[7] 张金炳，黄培鸿，杨小毛，等．东莞华兴电器厂生活污水人工快速渗滤处理系统[J]．环境工程，2003(6)：32-35．

[8] 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(1)：45-48．

[9] 平玉焕，张焕祯，王智丽，等．人工快速渗滤系统非饱水层去除COD和氨氮[J]．环境工程学报，2015，9(12)：5837-5842．

[10] 刘操．人工快速渗滤系统处理温榆河原水试验研究[J]．给水排水，2010，46(3)：132-136．

[11] 刘美菊，万里，郑凤君，等．高温灭菌酸性红壤可能诱发其对烟草幼苗的锰毒害[J]．西南师范大学学报(自然科学版)，2019，44(5)：67-73．
[12] 甘海华，徐盛荣．红壤及其在有机无机复合体对磷的吸附与解吸规律探讨[J]．土壤通报，1994，25(6)：264- 266．
[13] 冯萃敏，蔡紫鹏，尹晓星，等．土壤渗滤系统中植物对地表雨水径流中磷的控制效果与影响分析[J]．环境污染与防治，2016，38(3)：25-33．
[14] 王萍，牛晓君，赵保卫．海绵铁吸附除磷机理研究[J]．中国给水排水，2003，19(3)：11-13．
[15] 万正芬，张学庆，卢少勇．19种人工湿地填料对磷吸附解吸效果研究[J]．水处理技术，2015，41(4)：35-39．
[16] 高照琴，白军红，温晓君，等．珠江河口不同类型湿地土壤有机磷矿化过程及其影响因素研究[J]．北京师范大学学报(自然科学版)，2018，54(1)：131-136．
[17] 万琼，雷茹，王信，等．海绵铁填料对城市内河污染物质去除[J]．环境化学，2019，38(9)：2128-2140．
[18] 杨亮亮，王怡．海绵铁和活性氧化铝滤柱净化城市景观水的对比[J]．中国给水排水，2017，33(19)：11-15．
[19] 李杰，李文譞，魏志勇．海绵铁/微生物协同互促除磷研究[J]．中国给水排水，2013，29(23)：124-127．
[20] 任杰，刘晓文，李杰．复合海绵铁处理污水的研究现状与机制分析[J]．应用化工，2019，48(12)：3026-3031．
[21] 刘玉春，杨小蛟，张芳园，等．基于NBS的生活污水污染物去除效果研究[J]．中国水利水电科学研究院学报，2019，17(1)：60-67．
[22] 马井泉，周怀东，董哲仁．水生植物对氮和磷去除效果的试验研究[J]．中国水利水电科学研究院学报，2005，3(2)：130-134．
[23] 李超，侯成林，吴为中，等．大清河人工快速渗滤系统示范工程效果分析[J]．生态环境学报，2010，19(12)：2960-2965．
[24] 马鸣超，姜昕，李俊，等．人工快速渗滤系统中硝化菌群脱氮作用解析[J]．中国环境科学，2008(4)：350-354．
[25] 吕晶晶，窦艳艳，张列宇，等．改良型土壤渗滤系统处理生活污水脱氮除磷[J]．环境工程，2018，36(3)：38-43．
[26] 黄廷林，路程，周真明，等．沸石与生物沸石薄层覆盖技术削减富营养化景观水体氮比较研究[J]．环境工程学报，2013，7(11)：4290-4294．
[27] 何洁，刘长发，王海，等．3种载体生物滤器对养殖废水处理效果[J]．中国水产科学，2003，(3)：242-245．
[28] 马文洁，张卫民，戴强，等．人工快速地下渗滤系统处理农村生活污水的实验研究[J]．水处理技术，2014，40(12)：91-94．
[29] 王禄，喻志平，赵智杰．人工快速渗滤系统氨氮去除机理[J]．中国环境科学，2006(4)：500-504．
[30] 陆风海，张新颖，吴志超，等．天然沸石颗粒对NH4+动态吸附过程中的离子交换特性研究[J]．环境工程学报，2011，5(4)：795-800．
[31] 杨永愿，汪晓军，赵爽，等．沸石曝气生物滤池短程硝化特性及其机制[J]．中国环境科学，2017，37(12)：4518-4525．
[32] RAMIREZVARGAS R，SERRANOSILVA N，NAVARRONOYA Y E，et al．454Pyrosequencing-based characterization of the bacterial consortia in a well established nitrifying reactor[J]．Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research，2015，72(6)：990-997．
[33] KINDAICHI T，ITO T，OKABE S．Ecophysiological interaction between nitrifying bacteria and heterotrophic bacteria in autotrophic nitrifying biofilms as determined by microautoradiography-fluorescence in situ hybridization[J]．Applied & Environmental Microbiology，2004，70(3)：1641．
[34] 朱龙龙，邱立平，等．低温条件下3种填料吸附氨氮的研究[J]．济南大学学报(自然科学版)，2016，30(4)：287-292．
[35] 郝晓地，魏丽，等．火山岩填料曝气生物滤池内循环强化脱氮试验研究[J]．环境工程学报，2009，3(2)：239-245．

(下转第515页)

Evaluation of regional water environment carrying capacity based on ANP-Normal cloud model

GU Qiwei[1], ZHANG Liang[1], ZHAO Xiaohui[2], WANG Huansong[1], Dong Yan[1]

(1. *Environmental Consulting and Monitoring Center*, *Environmental Protection Research of Light Industry*, *Beijing* 100089, *China*;
2. *Department of Water Ecology and Environment*, *China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100038, *China*)

Abstract: For the regional water environment carrying capacity (RWEEC) appraisal, it is a challenge to express network relations and uncertainty in quantitative evaluation. Thus, this study designed the RWEEC assessment method of ANP (Analytic Network Process)-Normal cloud model. This approach relies on the DPSR (Driving-Pressure-State-Response) logical relation, including water-driven, water pollution pressure, water-environmental state, and ecological response. This paper selected Beijing Chaoyang District as a study area. The results show that RWECC has a high bearing power calculation based on the ANP-normal cloud model. It characterized the situation of the better RWECC of Chaoyang in 2017. The weight of water quality standard-rated in the water-functional zone and vegetation-covered shoreline accounts for 48.93% in total. These indexes has a clustering relationship with the RWEEC index in Chaoyang, which may be the critical factor to improve the RWEEC of Chaoyang District. It conforms to the urban pattern development of "Two-axis, two-belt, and three districts.".

Keywords: water environment carrying capacity; analytic network process model; normal cloud model; relationship of driving-pressure-state-response; Beijing´s Chaoyang district

(责任编辑：王学凤)

(上接第505页)

Study on nitrogen and phosphorus removal effect of improved constructed rapid infiltration system

ZAHNG Jiebin[1], ZHU Mulan[1, 2]

(1. *School of environmental science and engineering*, *Xiamen University of Technology*, *Xiamen* 361024, *China*;
2.*Water Resources and environmental Institute*, *Xiamen University of Technology*, *Xiamen* 361024, *China*)

Abstract: Constructed rapid infiltration (CRI) system is a well-known non-dynamic ecological treatment technique, but the removal rate of nitrogen and phosphorus is generally low in the traditional CRI system. In this study, sponge iron, zeolite, volcanic rock, red loam and mixed sand were used as fillers to construct an improved CRI system. Under the hydraulic load of $1m^3/(m^3 \cdot d)$, the actual domestic sewage was used as the experimental inlet water for a period of 20 days. The experimental results show that the effluent TP, TN and NH_3-N concentration tends to be stable after 16 days of operation, and the average effluent concentration is 0.21mg/L, 8.38mg/L and 2.34mg/L, respectively, which can meet the limits of 0.5mg/L, 15mg/L and 5mg/L of the "Discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant" (GB18918-2002). The total average removal rate of TP, TN and NH_3-N is 84.44%, far higher than that of the traditional CRI system (44.06%). The results of this study provide an effective technical measure for ecological treatment of rural domestic sewage.

Keywords: constructed rapid infiltration system; ecological treatment; rural sewage; nitrogen and phosphorus removal; effluent water quality

(责任编辑：祁　伟)