

周超群, 吴磊, 李先宁, 等. 用于农村污水安全灌溉的新型氮磷无机化反应器的实验研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1443–1450.

ZHOU Chao-qun, WU Lei, LI Xian-ning, et al. A novel nitrogen and phosphorus inorganic reactor to process rural sewage for safe irrigation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1443–1450.

用于农村污水安全灌溉的新型氮磷无机化反应器的实验研究

周超群, 吴磊*, 李先宁, 洪月菊, 张佳杰

(东南大学能源与环境学院, 南京 210096)

摘要:以常用的农村污水处理工艺“厌氧池+好氧生物滤池”为研究对象,通过运行参数的调控,把该工艺以除磷脱氮达到一级 B 排放为目的,转变为以除碳保磷保氮的资源化利用为目的,成为用于农村污水安全灌溉的新型氮磷无机化反应器。实验结果表明:在进水 COD 浓度为 174~384 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NH_4^+-N 浓度为 28.45~97.28 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TN 浓度为 37~141.9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP 浓度为 3.65~14.57 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 厌氧池水力停留时间 $\text{HRT}=4\text{ h}$, 好氧生物滤池水力负荷 $\text{HLR}=5.4\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 时,氮磷无机化反应器的出水 NH_4^+-N 浓度为 45 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度为 6.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, COD 平均浓度均在 60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,粪大肠杆菌群 $<10\ 000$ 个 $\cdot\text{L}^{-1}$,均满足《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)中可生食蔬菜安全灌溉的水质要求。研究表明新型氮磷无机化反应器可以实现农村生活污水安全灌溉。

关键词:农村生活污水;氮磷资源化;氮磷无机化;安全灌溉

中图分类号:X703.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)07-1443-08 doi:10.11654/jaes.2017-0231

A novel nitrogen and phosphorus inorganic reactor to process rural sewage for safe irrigation

ZHOU Chao-qun, WU Lei*, LI Xian-ning, HONG Yue-ju, ZHANG Jia-jie

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In this paper, a novel nitrogen and phosphorus inorganic reactor is designed to remove organic pollutants but to keep the nutrients such as nitrogen and phosphorus in tailwater, for safe irrigation. It works by adjusting the operation parameters of the anaerobic tank and aerobic biofilter combination, which is popular in rural sewage treatment projects because its discharge meets the first level B standard. The experimental data show that its average concentration of COD was under 60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and the average number of effluent fecal coliform colonies were under 10 000 per litre after rural sewage (influent COD 174~384 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NH_4^+-N concentration 28.45~97.28 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TN concentration 37~141.9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP concentration 3.65~14.57 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) had been processed with an optimal $\text{HRT}=4\text{ h}$ in the anaerobic tank and aerobic biological filter and an optimal $\text{HLR}=5.4\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ in the novel reactor. The processed rural sewage quality met the requirements for direct irrigation of edible vegetables within the national standards for irrigation water quality (GB 5084—2005). Our results indicate that a novel nitrogen and phosphorus inorganic reactor can be used to realize the safe irrigation using rural domestic sewage.

Keywords: rural sewage; nitrogen and phosphorus resources; inorganic nitrogen; inorganic phosphorus; safe irrigation

收稿日期:2017-02-27

作者简介:周超群(1990—),男,湖北汉川人,硕士研究生,从事水污染控制研究。E-mail:834088092@qq.com

*通信作者:吴磊 E-mail:wulei@seu.edu.cn

基金项目:国家科技支撑计划项目(2013BAJ10B12-02)

Project supported: The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2013BAJ10B12-02)

我国是水资源严重短缺的国家,全国正常年份农业缺水量达 300 亿 m^3 , 而近年来全国农村每年产生生活污水超过 100 亿 m^3 ^[1]。农村生活污水性质比较稳定,基本不含重金属和有毒物质,可生化性较好^[2],成为潜在的农业灌溉水源^[3]。污水中的氮磷等物质对水环境是一种污染物,而对于农业生产是必需的营养物质,是一种宝贵的资源^[4-5]。但是,生活污水直接回灌农田,由于悬浮颗粒和有机物浓度过高,长期使用会造成土壤的板结和厌氧化,从而导致土壤退化和植物烂根等问题^[6-7]。

目前许多地方的农村生活污水治理通常是将污水处理达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 B 标准后排放,不但工艺复杂,投资相对较大^[8],而且尾水中可用于农作物直接吸收的氮磷含量较低,大幅降低了污水的肥效^[9],不利于污水的回用灌溉。本文提出了一种新型氮磷无机化反应器,不以脱氮除磷为首要目的,而是尽量保留污水中的氮、磷成分,最后回用于农业灌溉。该反应器本质还是由厌氧池和好氧生物滤池组成的 A/O 系统, A 段的主要功能是要去除近 50% 的 COD, 以减少后续 O 段的负荷;与传统以脱氮为目的的 A/O 系统相比,不设回流,避免反硝化脱氮浪费氮资源。同时通过缩短 A 段、O 段的反应时间,使厌氧池尽量停留在水解酸化阶段,好氧生物滤池尽量停留在碳化、氨化阶段,有研究表明^[10]氨氮也是易于农作物通过根系直接吸收的无机氮形式,因此没有必要氧化到硝酸盐氮。总之,该反应器的研究目标就是使农村生活污水尾水中尽可能保留易于农作物利用的氮、磷形态和数量^[11-12],提高农作物对肥料的利用效率,同时 COD 浓度达到《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)中可生食蔬菜安全灌溉的水质要求,实现农村生活污水安全灌溉。

1 材料与方法

1.1 试验装置

本试验的装置如图 1 所示。厌氧池为有机玻璃材质,直径为 300 mm,有效高度为 400 mm,有效体积 28 L,底部设锥形排泥区(高度为 100 mm),上部设沉

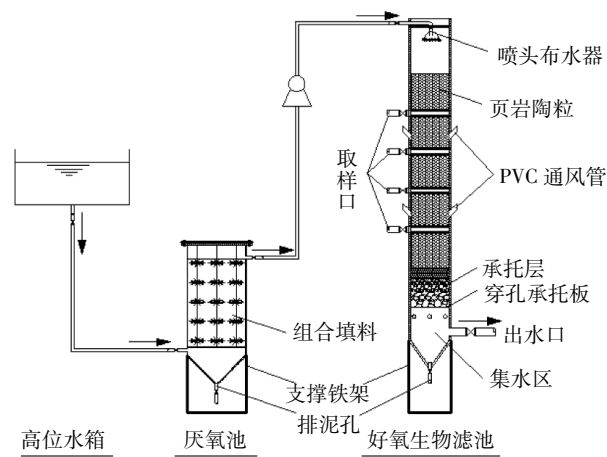


图 1 试验装置示意图

Figure 1 The sketch map of the testing apparatus

淀区(高度为 100 mm),反应器内悬挂组合填料,购自宜兴市乐克环保设备有限公司,规格为直径 150 mm、长 80 mm。组合填料在厌氧池中的具体布设参数见表 1。

厌氧池和好氧生物滤池之间设有简易调节池,好氧生物滤池进水为调节池出水。好氧生物滤池为有机玻璃材质,直径为 250 mm,采用喷头进行均匀布水,滤池内由下至上依次为集水区(高度为 200 mm)、承托层(高度为 200 mm)、填料层(高度为 1000 mm),滤池有效体积为 48 L;填料层由上而下每隔 200 mm 设 1 个取样口,每隔 400 mm 设 2 个通风口,底部集水区设 1 个出水口。好氧生物滤池内填料为 5~8 mm 頁岩陶粒,其主要性能如表 2。

表 2 頁岩陶粒主要性能参数

Table 2 Performance parameters of ceramicsite

填料名称	粒径/mm	表观密度(容重)/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	比表面积/ $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$	孔隙率/%
陶粒	5~8	0.80~1.55	1.4~2.2	1.0~2.50	55~75

1.2 试验用水水质及试验设计

试验用水取自安徽省马鞍山市郑蒲港新区姥长新村周边农户化粪池污水,主要来源于厕所、卫生淋浴污水及部分厨房排水。厌氧池出水取自厌氧池

表 1 厌氧池组合填料布设参数

Table 1 Layout parameters of combination packing in anaerobic pool

填料类型	填料规格	单束填料片数	布置方式
组合填料	填料束长度 0.4 m, 数目 5 根	8 片	以厌氧池中心为参照点,十字对称取四个点固定,各布设点距中心点 75 mm

与好氧生物滤池连接管处,好氧生物滤池出水取自好氧生物滤池填料深度为 1 m 处的取样口。有研究表明^[13]好氧生物滤池填料高度为 1 m 时,好氧生物滤池具有最好的 COD 去除和氮磷无机化效能。试验在 2014 年 8 月至 10 月进行,试验期间温度变化不大(25~35 ℃),进水水质见表 3。

表 3 试验用水水质

Table 3 Quality of raw wastewater

序号	水质指标	变化范围	平均值
1	COD _{Cr} /mg·L ⁻¹	174~384	265.3
2	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	28.45~97.28	56.88
3	NO ₂ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	0~0.14	0.023
4	NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	0~3.85	1.56
5	TN/mg·L ⁻¹	37~141.9	92.10
6	PO ₄ ³⁻ -P/mg·L ⁻¹	2.59~11.07	6.29
7	TP/mg·L ⁻¹	3.65~14.57	8.32

本试验通过改变进水流量的方式调节厌氧池水力停留时间(HRT)和好氧生物滤池水力负荷(HLR),分别设置五组水力停留时间(HRT=3、4、5、6、7 h)和五组水力负荷(HLR=3.1、3.6、4.2、5.4、7.2 m³·m⁻²·d⁻¹)。氮磷无机化反应器采用复合式接种挂膜方法进行挂膜启动。启动完成时,原水 COD 浓度为 156~300 mg·L⁻¹,厌氧池和好氧生物滤池 COD 去除率范围分别为 40%~45% 和 70%~75%。其后每改变一次 HRT 或 HLR,连续运行 3 d 待装置稳定后进行连续 4 d 的试验检测,检测数据取平均值进行绘图。确定新型氮磷无机化反应器厌氧池适宜水力停留时间和好氧生物滤池适宜水力负荷后,按适宜运行参数组合对氮磷无机化反应器运行 5 d 以获取试验数据。

1.3 试验分析项目与检测方法

试验主要分析常规水质指标,包括温度、COD_{Cr}、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TN、TP 和可溶性正磷酸盐,测定方法见文献[14]。

1.4 有机氮、磷无机化表征方法

在厌氧池内,主要是厌氧微生物和兼性厌氧微生物通过还原脱氨、水解脱氨和脱水脱氨三种途径的氨化反应对有机氮化合物进行无机化。氮元素的转化过程主要是微生物的同化消耗,有机氮向 NH₄⁺-N 的转化。厌氧池出水相较于进水,有机氮浓度减少,氨氮浓度增加,NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 的含量基本保持不变。

在好氧生物滤池内,氮元素的转化过程较复杂,包括有机氮的氨化降解、NH₄⁺-N 经亚硝化作用转化

为 NO₂⁻-N 以及 NO₂⁻-N 经硝化作用转化为 NO₃⁻-N。好氧生物滤池出水相较于进水,有机氮浓度减少,氨氮浓度减少,NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 的含量增加。

新型氮磷无机化反应器中有机氮的无机化程度采用进出水中有机氮的减少百分比来表征:

$$\text{有机氮的无机化率}(\eta_{\text{org-N}}) = \frac{\text{orgN}_{\text{进}} - \text{orgN}_{\text{出}}}{\text{orgN}_{\text{进}}} \times 100\%$$

新型氮磷无机化反应器是为了获取较高 NH₄⁺-N 浓度的出水,在实验数据分析时,同步对比厌氧池 NH₄⁺-N 增加百分数 and 好氧生物滤池 NH₄⁺-N 减少百分数,即:

$$\text{氨氮增加百分数} = \frac{\text{NH}_4^{+}_{\text{出}} - \text{NH}_4^{+}_{\text{进}}}{\text{NH}_4^{+}_{\text{进}}} \times 100\%$$

$$\text{氨氮减少百分数} = \frac{\text{NH}_4^{+}_{\text{进}} - \text{NH}_4^{+}_{\text{出}}}{\text{NH}_4^{+}_{\text{进}}} \times 100\%$$

新型氮磷无机化反应器提供的环境不适合聚磷菌的生长,同时未设回流单元。对该反应器厌氧段和好氧段来说,磷元素的转化过程主要是微生物自身同化作用的吸收利用、滤料的吸附截留作用、有机磷通过微生物的分解作用转化为无机态磷,无机态磷的形态主要是 PO₄³⁻-P。有机磷的无机化可用 PO₄³⁻-P 与 TP 的比值来表征:

$$\text{有机磷的无机化}(\eta_{\text{P}}) = \frac{\text{PO}_4^{3-}\text{-P}}{\text{TP}} \times 100\%$$

$$\text{有机磷的无机化增长率}(\Delta\eta_{\text{P}}) = \frac{\eta_{\text{P出}} - \eta_{\text{P进}}}{\eta_{\text{P进}}} \times 100\%$$

2 结果与讨论

2.1 厌氧池适宜水力停留时间的确定

图 2a 和图 2b 分别表示厌氧池内有机氮无机化率 $\eta_{\text{org-N}}$ 和氨氮增长率在不同水力停留时间下的变化情况;图 2c 和图 2d 分别表示厌氧池内有机磷无机化增长率和 COD 的去除率在不同水力停留时间下的变化情况。

由图 2a 和图 2d 可知,随着 HRT 的延长,厌氧池中有机氮无机化率 $\eta_{\text{org-N}}$ 和 COD 去除率均呈现逐步增加的趋势。随着 HRT 的延长,微生物与有机物接触时间延长,反应更充分,COD 去除率逐渐增大,同时污水与底部污泥和组合填料上生物膜的接触时间加长,截留的颗粒态有机氮越多,反应器的氨化反应进行得越充分,故有机氮无机化率 $\eta_{\text{org-N}}$ 也就越大。

在试验条件下,HRT=3 h 时有机氮无机化率 $\eta_{\text{org-N}}$ 为 11.66%,HRT=4 h 时有机氮无机化率 $\eta_{\text{org-N}}$ 增大至 29.29%(图 2a)。利用 SPSS 22 对 HRT=3 h 和 HRT=4

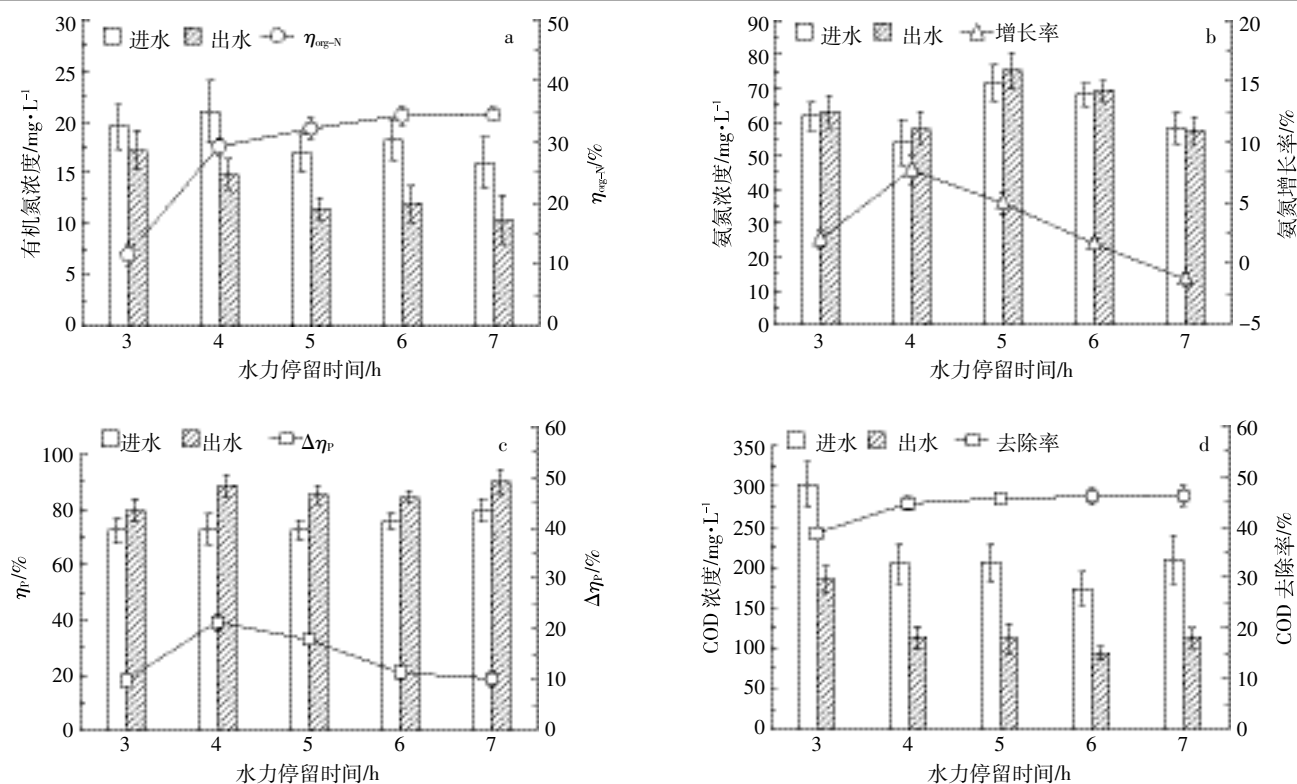


图2 不同水力停留时间厌氧池氮、磷无机化效能和 COD 去除效果

Figure 2 η_{org-N} and $\Delta\eta_P$ trends and COD removal efficiency under different HRT

h 时的两组有机氮无机化率 η_{org-N} 在 95% 置信区间进行 T -检验, 检验结果 $P=0.023<0.05$, 表明 HRT 由 3 h 增大到 4 h 时, 有机氮无机化率 η_{org-N} 显著增加; HRT>4 h 后, HRT 的增大对有机氮无机化率 η_{org-N} 影响不显著 ($P>0.05$), 有机氮无机化率 η_{org-N} 变化趋势趋于平缓。在试验条件下, HRT=3 h 时 COD 去除率为 38.74%, HRT=4 h 时 COD 去除率增大至 44.61% (图 2d)。利用 SPSS 22 对 HRT=3 h 和 HRT=4 h 时的两组 COD 去除率在 95% 置信区间进行 T -检验, 检验结果 $P=0.016<0.05$, 表明 HRT 由 3 h 增大到 4 h 时, COD 去除率显著增加 ($P<0.05$); HRT>4 h 后, HRT 的增大对 COD 去除率影响不显著 ($P>0.05$), COD 去除率变化趋势趋于平缓, HRT=7 h 时 COD 去除率仅由 HRT=4 h 时的 44.61% 增大至 46.19%。随着 HRT 的延长, 水解酸化池内的主要反应由颗粒物和胶体物质的截留吸附阶段过渡到了非溶解态有机物转化为溶解态有机物以及部分溶解性复杂有机物降解为小分子有机物的过程, 有机物从形式上和质上发生变化, 而在总的数量上变化较小^[15], COD 去除率变化较小。

由图 2b 和 2c 可知, 厌氧池内氨氮增长率和有机磷无机化增长率 $\Delta\eta_P$ 均随着 HRT 的延长呈现先增大

后减小的趋势。HRT=4 h 时氨氮增长率最大为 7.71%, 表明厌氧池内氨化作用增加的氨氮和微生物同化作用消耗的氨氮相差不大。当 HRT=7 h 时出水氨氮浓度甚至低于进水氨氮浓度, 此时随着生活污水在厌氧池内的停留时间延长, 生物同化作用消耗污水中更多的氨氮^[16]。Siegrist 等^[17]也发现有厌氧池(无回流)出水氨氮减小的现象。在厌氧池内, 有机磷经微生物的作用会转化为磷酸根, 微生物在生长的同时会利用一部分磷酸根^[18]。当 HRT=4 h 时, 有机磷无机化增长率 $\Delta\eta_P$ 最大为 21.39% (图 2c)。

新型氮磷无机化反应器中厌氧池的作用主要是为减轻后续好氧段处理的有机负荷而尽量提高处理过程中无机态氮磷的保有量。结合上面的分析和图 2d 中好氧生物滤池对 COD 去除率的分析, 当厌氧池 HRT $\geq$ 4 h 时, 厌氧池 COD 去除率 $\geq$ 44.61%, 此时已较大程度地发挥了厌氧池减轻后续好氧段处理有机负荷的作用, 可以初步确定厌氧池适宜水力停留时间应不小于 4 h。由于在厌氧池中整个氮元素的转化过程主要是微生物的同化消耗, 使有机氮向 NH_4^+-N 的转化在厌氧池中并不适合用有机氮无机化率表示无机态氮的保有量, 而应该用氨氮增长率表示。故结合

图 2b 和 2c 的分析,当厌氧池 HRT=4 h 时,厌氧池氨氮增长率、有机磷无机化增长率 $\Delta\eta_p$ 均为最大,使厌氧池处理过程中无机态氮磷的保有量得到了最大程度的提高。综上所述,确定厌氧池适宜 HRT=4 h,此时厌氧池充分发挥了其在新型氮磷无机化反应器中的作用。

2.2 好氧生物滤池适宜水力负荷的确定

图 3a 和图 3b 分别表示好氧生物滤池内有机氮无机化率 $\eta_{\text{org-N}}$ 和氨氮减少百分数在不同水力负荷下的变化情况。图 3c 和图 3d 分别表示好氧生物滤池内有机磷无机化增长率和 COD 的去除率在不同水力负荷下的变化情况。

由图 3a 可知,随着 HLR 的增加,好氧生物滤池中有有机氮无机化增长率 $\eta_{\text{org-N}}$ 呈现逐步减小的趋势。当 HLR 较小时,填料表层的微生物与水中的有机氮有较长的接触时间,可以转化较多的有机氮,与此同时,滤池内滤速较小,水流的扰动较小,颗粒态有机氮^[19]在填料上的吸附、截留效果较好。当 HLR 不断增大,微生物与水流中有机氮的接触时间逐渐缩短,加之水流对填料的冲刷影响,使得 $\eta_{\text{org-N}}$ 降低。

由图 3b 可知,随着 HLR 的增大,好氧生物滤池

的氨氮减少百分率呈现先减小后趋于稳定的变化趋势,由 48.71% 减小至 29.42%。在好氧生物滤池内硝化作用是氨氮减少的主要原因,硝化细菌与碳化异养菌竞争 DO 和生存空间等,硝化细菌是严格好氧菌,对生长环境要求苛刻^[20],世代周期长,增长速度慢。当 HLR 较小时,有机负荷也较小,有机物成为限制异养菌生长的条件,生活污水与生物膜有充足的接触时间,有利于硝化反应的进行;HLR 的增大导致有机负荷的增大,此时滤池内碳化异养菌的生长繁殖速度加快,在竞争中逐步占据优势,对硝化反应产生抑制作用^[21],对氨氮的转化能力降低。

由图 3c 和图 3d 可知,随着 HLR 的增大,好氧生物滤池中有有机磷无机化增长率 $\Delta\eta_p$ 和 COD 去除率均呈先增大后减小的变化趋势。当 HLR 较小时,污水在滤池内的停留时间较长,磷与填料表面生物膜的接触时间较长,微生物自身同化作用消耗的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 较多,由于经过了氮磷无机化反应器处理后 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 占 TP 比例较大,此时出水 TP 浓度受 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 影响较大,几乎不受有机氮浓度影响,故 $\Delta\eta_p$ 较小;随着水力负荷的增大,水体中磷与生物膜的接触时间缩短,微生物同化消耗量减少,从而出水中保留了较高的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含

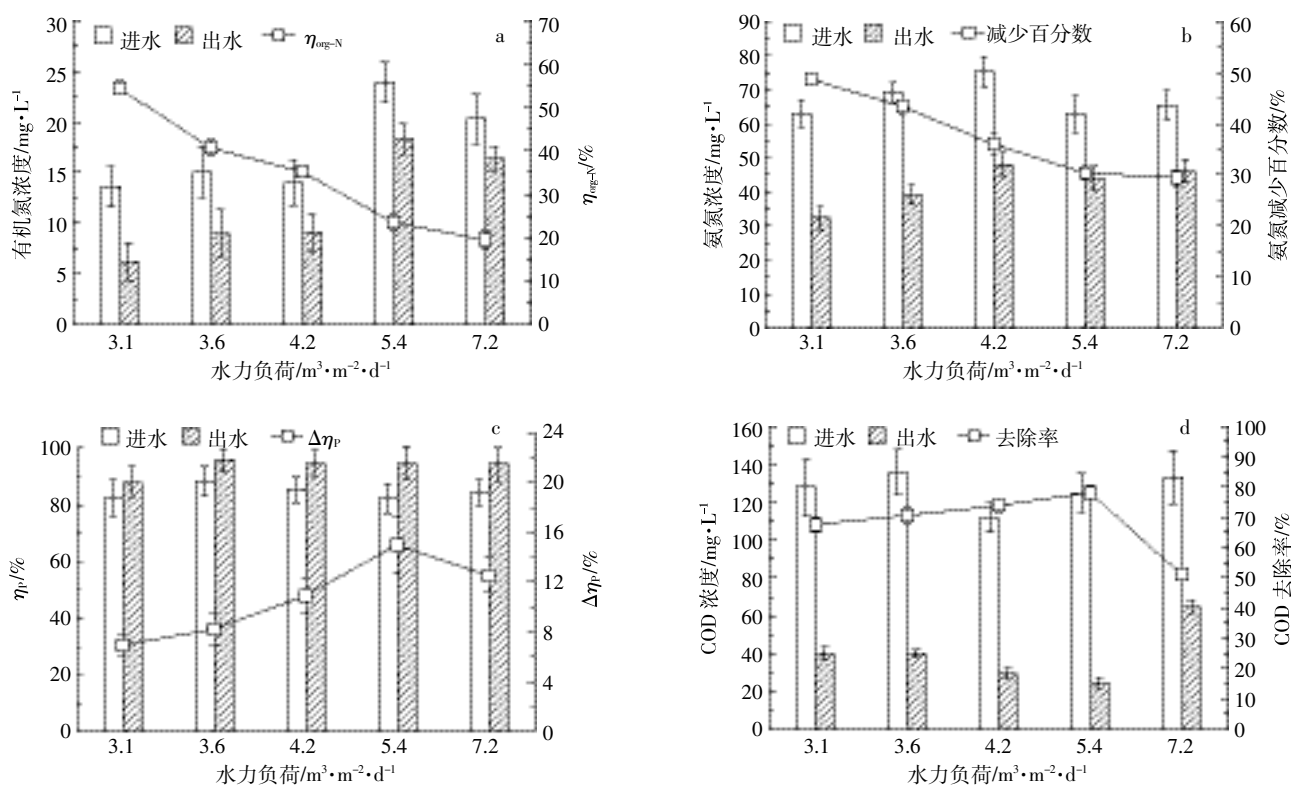


图 3 不同水力负荷好氧生物滤池氮、磷无机化效能和 COD 去除效果

Figure 3 $\eta_{\text{org-N}}$ and $\Delta\eta_p$ trends and COD removal efficiency under different HLR

量,HLR 继续增大,水流对填料表面生物膜的冲刷作用增强,使得部分截留的物质或者填料表层老化的生物膜被冲刷下来,致使出水中 TP 浓度增大, $\Delta\eta_p$ 减小。与此同时,当 HLR 较小时,虽然污水在滤池中的停留时间较长,有机物能够与陶粒表面生物膜充分接触反应,但此时填料表面生物膜受水力冲刷较弱,生物膜不断增厚却不能及时得到更新,不仅阻碍了污水和生物膜之间有机物和氧的传递,也使得生物膜容易被堵塞^[2];随着水力负荷的增大,进入滤池的有机负荷增大,微生物可利用的营养物增多,增殖速度加快,降解性能提升,且污水与生物膜之间的传质速度加快,使污水中的 DO 及有机物更易扩散到生物膜内^[23];HLR 继续增大,使填料表面生物膜受水力冲刷增强,污水与生物膜接触时间变短,COD 去除率降低。故当 $HLR=5.4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,有机磷无机化增长率 $\Delta\eta_p$ 和 COD 去除率分别达到最大值 14.97% 和 78.26%。

本研究需要好氧生物滤池具有较好的氮磷无机化效能和 COD 去除效果,并且该处理单元要在保证出水 COD 浓度满足《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)的基础上,尽可能保留易于农作物利用的氮、磷形态和数量。

综上所述,由图 3 可知,当 $HLR>5.4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,好氧生物滤池的出水 COD 浓度大于 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,不能满足《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)对可生食蔬菜灌溉水质的要求;当 $HLR \leq 5.4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,好氧生物滤池的出水 COD 浓度均小于 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,且当 $HLR=5.4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 时好氧生物滤池的 COD 去除率和有机磷无机化增长率 $\Delta\eta_p$ 均达到最大值,氨氮减少百分率较小,因此确定好氧生物滤池适宜 HLR 取值为 $5.4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

2.3 适宜运行参数组合下新型氮磷无机化反应器效能

在厌氧池 $HRT=4 \text{ h}$,好氧生物滤池 $HLR=5.4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 的适宜运行条件下,新型氮磷无机化反应器效能如图 4 所示。图 4a 和图 4b 分别表示新型氮磷无机化反应器的有机氮无机化率 $\eta_{\text{org-N}}$ 和氨氮减少百分率在适宜运行参数下的变化情况。图 4c 和图 4d 分别表示新型氮磷无机化反应器的有机磷无机化增长率和 COD 的去除率在适宜运行参数下的变化情况。

由图 4a 和图 4b 可知,在适宜运行参数下,新型氮磷无机化反应器的有机氮无机化率 $\eta_{\text{org-N}}$ 达到 32% 左右,氨氮减少百分率在 29% 左右,出水氨氮浓度在 $45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。由图 4c 可知,在适宜运行参数下,新

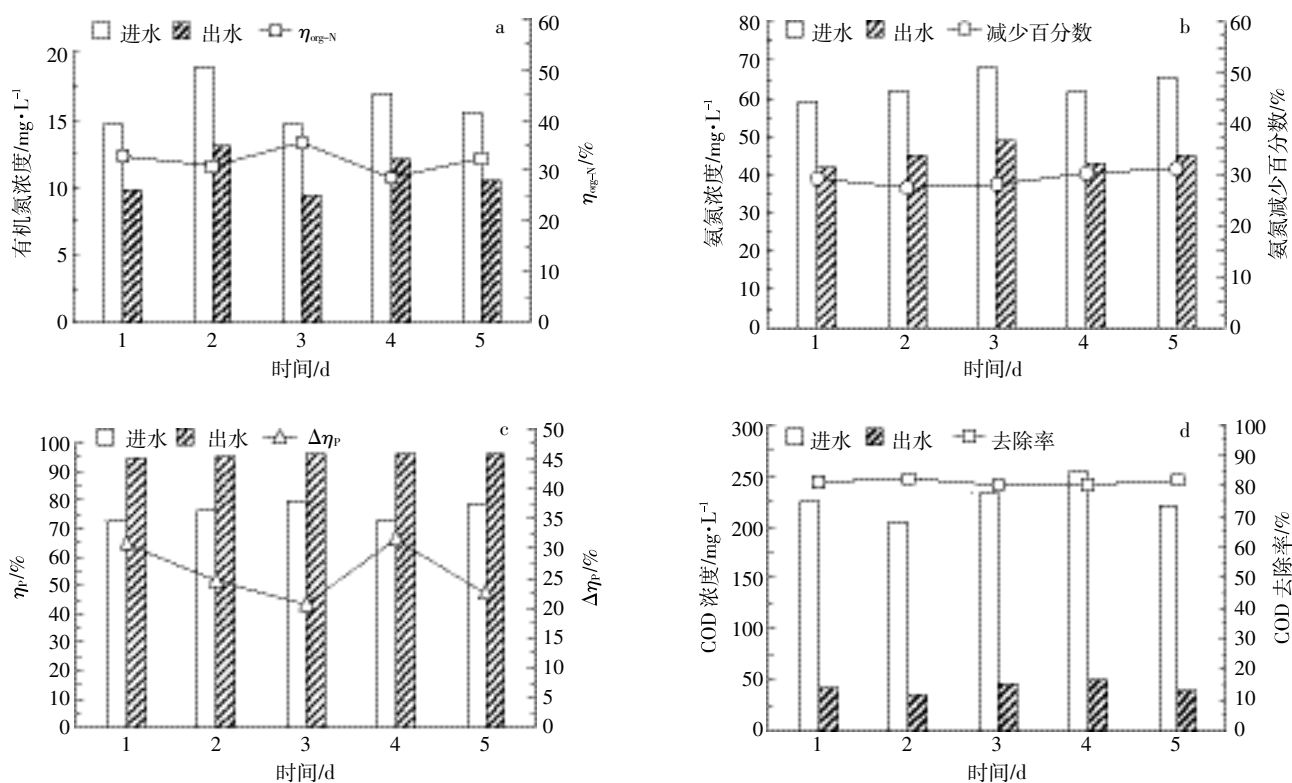


图 4 适宜运行参数下氮磷无机化反应器效能

Figure 4 Short-range nitrogen and phosphorus inorganic reactor's performance under optimum operating parameters

型氮磷无机化反应器的有机磷无机化增长率 $\Delta\eta_P$ 达到 26% 左右,出水有机磷的无机化率 η_P 达到 96% 左右,此时 $PO_4^{3-}-P$ 浓度为 $6.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右。由图 4(d)可知,在适宜运行参数下,新型氮磷无机化反应器的 COD 去除率达到 81% 左右,出水 COD 浓度均在 $60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。试验结果表明,在适宜运行参数下,新型氮磷无机化反应器出水氨氮和 $PO_4^{3-}-P$ 浓度分别约为 $45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $6.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,远高于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 B 标准中氨氮和 TP 的排放浓度,可为后续安全灌溉利用提供无机氮、磷肥;同时,新型氮磷无机化反应器出水中 COD 浓度均在 $60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,满足《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)用于可生食蔬菜安全灌溉的水质要求,可以实现农村生活污水安全灌溉。

2.4 新型氮磷无机化反应器出水的卫生学分析

考虑到污水灌溉后,部分病原微生物可能残留在灌溉作物表面,食用或接触后可能对人体产生健康风险,故在上述研究的基础上,以粪大肠杆菌群为指示,对新型氮磷无机化反应器出水水质进行公共卫生学分析。有研究表明,单独的厌氧反应器在高负荷条件(水力停留时间较低)下运行时,对病原菌的去除效果相对稳定,但对粪大肠杆菌的去除率较低,仅为 75% 左右^[24],一级生物滤池对污水中粪大肠杆菌去除率为 95% 左右,二级生物滤池的去除率可以达到 99.99%^[25]。新型氮磷无机化反应器由一个填充有组合填料的厌氧反应器和好氧生物滤池串联而成,对污水中粪大肠杆菌群有较好的处理效果。

实测数据表明:在厌氧池 $HRT=4\text{ h}$,好氧生物滤池 $HLR=5.4\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 的运行条件下,新型氮磷无机化反应器进水粪大肠杆菌群数为 $1.6\sim 6.1\times 10^5\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$,经过新型氮磷无机化反应器处理后出水粪大肠杆菌群数 $<10\,000\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率在 99% 左右,出水粪大肠杆菌群数指标满足《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)用于可生食蔬菜安全灌溉的水质要求。

3 结论

(1)综合考虑厌氧池在新型氮磷无机化反应器中的作用,确定厌氧池适宜 $HRT=4\text{ h}$ 。

(2)考虑到好氧生物滤池要在保证出水 COD 浓度满足《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)中可生食蔬菜灌溉的基础上,为尽可能保留易于农作物利用的氮、磷形态和含量,确定好氧生物滤池适宜 $HLR=5.4\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

(3)在厌氧池 $HRT=4\text{ h}$,好氧生物滤池 $HLR=5.4\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 的条件下,新型氮磷无机化反应器的出水氨氮和 $PO_4^{3-}-P$ 浓度远高于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 B 标准中的排放浓度,可为后续安全灌溉利用提供无机氮、磷肥;同时出水 COD 和粪大肠杆菌群浓度,均满足《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)中可生食蔬菜安全灌溉的水质要求,可以实现农村生活污水安全灌溉。

参考文献:

- [1] 鞠宇平. 村镇污水治理存在的问题与对策[J]. 水工业市场, 2012(9): 11-16.
JU Yu-ping. Problems and countermeasures of rural sewage treatment [J]. *Water-Industry Market*, 2012(9): 11-16.
- [2] 郭迎庆, 黄翔峰, 张玉先, 等. 太湖地区农村生活污水示范工程处理工艺的选择[J]. 中国给水排水, 2009, 25(4): 6-9.
GUO Ying-qing, HUANG Xiang-feng, ZHANG Yu-xian, et al. Selection of treatment process for rural domestic sewage demonstration project in Taihu Lake Region[J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(4): 6-9.
- [3] Samia K, Abdelkarim C, Yassin H, et al. The effect of long-term soil irrigation by wastewater on organic matter, polycyclic aromatic hydrocarbons, and heavy metals evolution: The case study of Zaouit Sousse (Tunisia) [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, 6(11): 4337-4346.
- [4] Khelil M N, Rejeb S, Henchi B, et al. Effects of irrigation water quality and nitrogen rate on the recovery of N-15 fertilizer by sorghum in field study [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2013, 44(18): 2647-2655.
- [5] Gong L, Jun L, Yang Q, et al. Biomass characteristics and simultaneous nitrification-denitrification under long sludge retention time in an integrated reactor treating rural domestic sewage [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 119: 277-284.
- [6] Mojid M A, Wyseure G. Implications of municipal wastewater irrigation on soil health from a study in Bangladesh [J]. *Soil Use and Management*, 2013, 29(3): 384-396.
- [7] Mukherjee V, Das A, Akhand A, et al. Toxicity and profitability of rice cultivation under wastewater irrigation: The case of the East Calcutta Wetlands [J]. *Ecological Economics*, 2013, 93: 292-300.
- [8] 马琳, 贺锋. 我国农村生活污水组合处理技术研究进展 [J]. 水处理技术, 2014, 40(10): 1-5.
MA Lin, HE Feng. Research progress of rural domestic wastewater treatment technology in China [J]. *Technology of Water Treatment*, 2014, 40(10): 1-5.
- [9] 侯怀恩, 王子强, 赵凤兰. 农村生活污水适度处理与资源化利用 [J]. 地域研究与开发, 2012, 31(6): 119-122.
HOU Huai-en, WANG Zi-qiang, ZHAO Feng-lan. Moderate treatment and resourcing utilization of rural moderate water [J]. *Areal Research and Development*, 2012, 31(6): 119-122.
- [10] 孙成斌. 什么形态的氮容易被作物吸收 [J]. 化学教育, 2002, 23(5):

- 3-4.
SUN Cheng-bin. What form of nitrogen is easily absorbed by crops[J]. *Journal of Chemical Education*, 2002, 23(5):3-4.
- [11] 妙颖, 杨胜科, 黄瑞华. 氮素在土壤-作物中迁移转化的试验研究[J]. *环境保护科学*, 2009, 35(4):89-91.
MIAO Ying, YANG Sheng-ke, HUANG Rui-hua. Study on migration and transformation of nitrogen in soil-crop system[J]. *Environmental Protection Science*, 2009, 35(4):89-91.
- [12] 安迪, 杨令, 王冠达, 等. 磷在土壤中的固定机制和磷肥的高效利用[J]. *化工进展*, 2013, 32(8):1967-1973.
AN Di, YANG Ling, WANG Guan-da, et al. Mechanisms of phosphorus fixation in soils and efficient utilization of phosphate fertilizer[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2013, 32(8):1967-1973.
- [13] 林海梅. 农村生活污水再生与资源化利用技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2013.
LIN Hai-mei. Study on renewable resource utilization technology of the rural domestic sewage[D]. Nanjing: Southeast University, 2013.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [15] Jiang S, Chen Y, Zhou Q. Effect of sodium dodecyl sulfate on waste activate sludge hydrolysis and acidification[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2007, 132:311-317.
- [16] 刘军, 郭茜, 瞿永彬. 厌氧水解生物法处理城市污水的研究[J]. *给水排水*, 2000(7):10-13.
LIU Jun, GUO Xi, QU Yong-bin. Study on anaerobic hydrolysis biological treatment of urban wastewater [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2000(7):10-13.
- [17] Siegrist H, Reithaar S, Koch G, et al. Nitrogen loss in a nitrifying rotating contactor treating ammonium-rich wastewater without organic carbon[J]. *Water Science and Technology*, 1998, 38(8/9):241-248.
- [18] 韩润平, 杨贯羽, 李宏魁. 生态滤池污水处理过程中磷形态转化与平衡[J]. *河南科学*, 2006, 24(4):593-595.
HAN Run-ping, YANG Guan-yu, LI Hong-kui. Change of forms and balance of phosphorus in eco-filter system for sewage treatment[J]. *Henan Science*, 2006, 24(4):593-595.
- [19] 韩润平, 邹卫华, 石杰, 等. 生态滤池污水处理过程中氮形态变化及平衡研究[J]. *郑州大学学报(理学版)*, 2005, 37(4):75-79.
HAN Run-ping, ZOU Wei-hua, SHI Jie, et al. Change of forms and balance of phosphorus in eco-filter system for sewage treatment[J]. *Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition)*, 2005, 37(4):75-79.
- [20] 李洋. 磁絮凝分离-生物滴滤组合工艺处理小城镇污水研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
LI Yang. Domestic wastewater treatment by combined processes of magnetic flocculation separation-trickling filter[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [21] 董启荣. 新型生物滤池处理生活污水的试验研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2010.
DONG Qi-rong. Study on wastewater treatment by new-designed biofilter[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010.
- [22] 刘学红. 水解-脉冲活性生物滤池处理农村生活污水技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
LIU Xue-hong. Study on the technology about the treatment of rural domestic wastewater by hydrolysis/pulse and active trickling filter[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [23] 李江雯. 混凝滤布过滤-生物滤池组合工艺处理小城镇生活污水研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
LI Jiang-wen. Treatment of domestic wastewater by combined processes of coagulation cloth media filtration-biofilter[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [24] 赵丙良. 粪尿废水的单独厌氧处理试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
ZHAO Bing-liang. Experimental study on anaerobic treatment of manure wastewater[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.
- [25] 陈艺娟, 方少波, 杨湘霞, 等. 生物滤池对生活污水中细菌总数及粪大肠菌群的去除效果分析[J]. *华南预防医学*, 2002, 28(4):58-59.
CHEN Yi-juan, FANG Shao-bo, YANG Xiang-xia, et al. Analysis of removal efficiency of total bacteria and fecal coliform bacteria in biological wastewater by biological filter[J]. *South China J Prev Med*, 2002, 28(4):58-59.