

# 径流中氮和磷在生物滞留池中的迁移及去除机理

杨利伟<sup>1</sup>, 张爽<sup>2</sup>, 杨周<sup>3</sup>, 窦妍<sup>2</sup>, 胡博<sup>1</sup>, 赵传靓<sup>1</sup>

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 3. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430000)

**摘要:** 生物滞留池是一种可以在源头控制地表径流污染物排放的措施。采用砂、土混合物(体积比为4:6)作为填料,研究了生物滞留池对地表径流中氨氮、硝态氮和总磷的去除效果,并采用CXTFIT 2.0软件对试验结果进行模拟。另外,利用吸附试验对氨氮、硝态氮和总磷在生物滞留池中的去除机理进行了解析。结果表明,生物滞留池对氨氮、硝态氮和总磷的去除过程可以采用CXTFIT 2.0软件进行模拟;氨氮、硝态氮和总磷穿透过程拟合出的阻滞系数( $R_d$ )越大,生物滞留池对其去除效果越好,其中,对氨氮的去除效果最好( $R_d=8$ ),对总磷的去除效果较好( $R_d=7$ ),对硝态氮的去除效果极其有限( $R_d=0.8$ );生物滞留池对氨氮和总磷的去除都是有利的吸附,且以不均匀的吸附方式为主。

**关键词:** 生物滞留池; 地表径流; 氮; 磷; CXTFIT 软件; 阻滞系数; 去除机理

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)09-0133-06

## Migration and Removal Mechanism of Nitrogen and Phosphorus of Surface Runoff in Bioretention Tank

YANG Li-wei<sup>1</sup>, ZHANG Shuang<sup>2</sup>, YANG Zhou<sup>3</sup>, DOU Yan<sup>2</sup>, HU Bo<sup>1</sup>,  
ZHAO Chuan-liang<sup>1</sup>

(1. School of Architectural Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. China Central South Municipal Design Institute Co. Ltd., Wuhan 430000, China)

**Abstract:** Bioretention tank is a measure to control surface runoff pollutant discharge from the source. The removal effect of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  and TP of surface runoff was investigated in a bioretention tank, which was filled with sand and soil mixture with a volume ratio of 4:6. Moreover, the CXTFIT 2.0 software was adopted to simulate the experimental results. The removal mechanism of TP,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  in the bioretention tank was analyzed by adsorption experiments. The results showed that the removal process of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  and TP in the bioretention tank could be simulated by CXTFIT 2.0 software. The larger the retardation coefficient ( $R_d$ ) fitted by penetration process of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  and TP, the better the removal effect of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  and TP could be obtained in the bioretention tank. Among them, the removal effect of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  was the best ( $R_d=8$ ), and the removal effect of TP was better when  $R_d$  was equal to 7, while the removal effect of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  was extremely limited when the optimal  $R_d$  was 0.8. The removal of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and TP in the

bioretention tank were both effective adsorption, which were mainly uneven adsorption.

**Key words:** bioretention tank; surface runoff; nitrogen; phosphorus; CXTFIT software; retardation coefficient; removal mechanism

据统计,城市河流中氮类污染物有1/2来自城市降雨过程中形成的地表径流,地表径流中含有的氮和磷导致约2/3的城市河流功能退化<sup>[1]</sup>,地表径流排放的污染物已经对城市水系构成了严重的威胁。生物滞留池,作为低影响开发(LID)系统的核心工程措施,在地表径流量和水质控制方面效果显著,对地表径流中总悬浮物、重金属以及病原菌的去除率在90%以上<sup>[2]</sup>。生物滞留池主要通过填料的过滤和吸附作用以及植物根系的吸收作用来达到净化径流水质的目的<sup>[3]</sup>。生物滞留池对地表径流的处理效果受诸多因素的影响,单纯通过试验的方法无法得出稳定可靠的结果。借助软件对生物滞留池中径流污染物的迁移进行数值模拟,具有便利性和较好的准确性。CXTFIT 2.0 是美国盐土实验室开发的用于研究一维土壤中水分及污染物运移的计算软件,该软件所需要输入的数据相对较少,模拟结果可靠<sup>[4]</sup>。

笔者以砂、土混合物(体积比为4:6)为填料,研究了实验室规模的生物滞留池对模拟地表径流中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和TP的去除效果,并采用CXTFIT 2.0 软件对试验结果进行模拟,以期揭示 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和TP在生物滞留池中的迁移规律,为生物滞留池的设计提供理论依据。另外,结合吸附试验,深入探讨了生物滞留池对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TP的去除机理。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验装置

生物滞留池试验装置由有机玻璃制成,总高为50 cm、内径为10 cm,如图1所示。装置从下到上依次为承托层、填料层、缓冲层和蓄水层,厚度分别为3、20、3和10 cm。缓冲层为砾石,防止水流对填料层产生冲击;填料层由砂和土壤混合物组成,土壤选用长安大学雁塔校区5号教学楼前的上层土壤,砂为普通建筑用砂,在室内自然风干,并通过2 mm筛孔筛分后按砂、土体积比为4:6进行混合;承托层为砾石,用于支撑生物滞留池填料。生物滞留池底设置采样口。承托层与填料层之间设置土工布,防止土壤颗粒进入承托层。装置进水由蠕动泵控制。

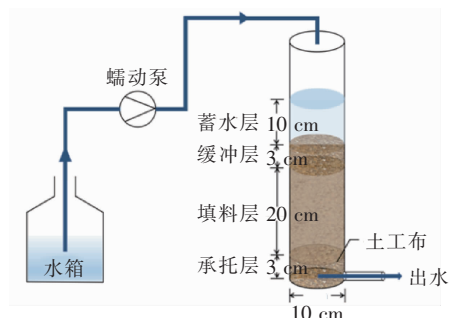


图1 生物滞留池模拟装置

Fig.1 Artificial simulated bioretention tank

### 1.2 试验方案

#### 1.2.1 穿透试验

##### ① 氯离子( $\text{Cl}^-$ )穿透试验

以 $\text{Cl}^-$ 为示踪剂,测定 $\text{Cl}^-$ 的穿透曲线。试验开始前,先用去离子水淋洗生物滞留池装置2 d,随后取水测定 $\text{Cl}^-$ 的本底浓度,记为 $C'$ ;然后,用蠕动泵将0.01 mol/L的氯化钾溶液( $C_0$ )注入生物滞留池装置,流量为200 mL/h;定时从土柱底部的出水口取水样测定 $\text{Cl}^-$ 浓度( $C_i$ ),至进、出水的 $\text{Cl}^-$ 浓度相等时,试验结束。以采样时间 $t$ 为横坐标、以 $\text{Cl}^-$ 相对浓度 $(C_i - C')/(C_0 - C')$ 为纵坐标,绘制 $\text{Cl}^-$ 的穿透曲线。

##### ② $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和TP的穿透曲线

实际地表径流中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TP浓度较小,采用实际地表径流中的污染物浓度进行穿透试验,不仅穿透时间漫长而且浓度测量误差较大,所以试验中将径流污染物浓度适当提高。试验进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和TP浓度分别为134、13.4、165 mg/L,分别由 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 、 $\text{KNO}_3$ 和 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 提供。

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和TP穿透试验过程与 $\text{Cl}^-$ 穿透试验过程相同。试验开始前,测定 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和TP的本底浓度,记作 $C_{\text{氨氮}}'$ 、 $C_{\text{硝氮}}'$ 和 $C_{\text{TP}}'$ ;试验过程中,每隔120 min 取样测定出水中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和TP浓度,记作 $C_{\text{氨氮}i}$ 、 $C_{\text{硝氮}i}$ 和 $C_{\text{TP}i}$ 。以采样时间 $t$ 为横坐标,分别以 $C_{\text{氨氮}i} - C_{\text{氨氮}}'$ 、 $C_{\text{硝氮}i} - C_{\text{硝氮}}'$ 和 $C_{\text{TP}i} - C_{\text{TP}}'$ 为纵坐标,绘制 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和TP的穿透曲线。

### 1.2.2 吸附试验

首先,配制不同  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和 TP 浓度的  $\text{NH}_4\text{Cl}$ 、 $\text{KNO}_3$  和  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  溶液,具体浓度见表1;随后,于3个500 mL磨口锥形瓶中分别加入30 g填料,并分别加入250 mL的  $\text{NH}_4\text{Cl}$ 、 $\text{KNO}_3$  和  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  溶液;最后,以0.1 mol/L的HCl或NaOH溶液将锥形瓶中的溶液pH值调整至7.00,封口,放置于25℃恒温水浴振荡器中振荡。每隔24 h测定锥形瓶中溶液的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和 TP 浓度,直至浓度达到稳定。每组试验进行3次。吸附试验完成后,采用Langmuir和Freundlich两种吸附方程对试验结果进行拟合,研究  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和 TP 在填料中的吸附和解吸过程,获得填料对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和 TP 吸附能力的大小以及生物滞留池对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和 TP 的去除机理。

表1 吸附试验中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和 TP 的浓度

Tab.1  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  and TP concentrations in adsorption experiment  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	浓 度				
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	134.0	107.2	80.4	53.6	26.8
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	15.5	13.2	10.9	8.5	6.4
TP	160.0	128.0	96.0	64.0	32.0

### 1.3 CXTFIT 模型

CXTFIT 2.0 是美国盐土实验室开发的用于描述一维土壤溶质迁移过程的软件,可用于溶质迁移模型参数率定,预测一定时间、一定空间内的溶质运移过程。CXTFIT 2.0 用对流-弥散(CDE)模型描述污染物的迁移过程。当孔隙水流速度( $v$ )、弥散系数( $D_0$ )、阻滞系数( $R_d$ )等参数无法通过试验获得时,可以采用CXTFIT 2.0 软件通过非线性最小二乘法拟合来获得<sup>[5]</sup>。

在稳定水流条件下,CDE模型通常以下式描述均质土壤一维瞬态溶质传输:

$$R = \frac{\partial C_{(x,t)}}{\partial t} = D_0 \frac{\partial^2 C_{(x,t)}}{\partial x^2} - v \frac{\partial C_{(x,t)}}{\partial x} \quad (1)$$

式中: $t$ 是扩散时间; $x$ 是扩散距离; $C_{(x,t)}$ 是多孔介质中溶质运移通量浓度; $v$ 是孔隙水流速度; $D_0$ 是弥散系数; $R$ 是延迟因子(无量纲),用于考虑线性可逆的均衡吸附。

当输入的污染物浓度固定时,CDE模型中溶质运移过程的边界条件为:

$$C_{(0,t)} = C_0 \quad (2)$$

半无限外边界条件近似有限长土柱外边界:

$$C_{(\infty,t)} = 0 \quad (3)$$

溶质运移初始边界条件为:

$$C_{(x,0)} = 0 \quad (4)$$

在一维稳态条件下,式(1)~(4)的解析解为:

$$\frac{C_{(x,t)}}{C_0} = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left[ \frac{x - U \cdot t}{2(D \cdot t)^{\frac{1}{2}}} \right] + \exp \left( \frac{U \cdot x}{D} \right) \times \operatorname{erfc} \left[ \frac{x + U \cdot t}{2(D \cdot t)^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} \quad (5)$$

式中: $D = D_0/R$ ,  $U = v/R$ 。

使用CXTFIT 2.0 软件对示踪剂  $\text{Cl}^-$  实测的穿透过程进行拟合,从拟合曲线可得出二维水动力学参数。将拟合得到的参数代入模型,可获得不同  $R_d$  对应的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TP 穿透曲线。

### 1.4 分析方法

水样经0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤后再进行水质分析。其中,TP:钼酸铵分光光度法; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ :紫外分光光度法; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ :纳氏试剂分光光度法; $\text{Cl}^-$ :硝酸银滴定法。

## 2 结果与讨论

### 2.1 生物滞留池的水动力学参数法

使用CXTFIT 2.0 软件对实测的  $\text{Cl}^-$  穿透过程进行拟合,结果见图2。从拟合曲线可得出孔隙水流速度  $v$ 、弥散系数  $D_0$  和弥散度  $\alpha$  等水动力学参数,其中  $v$  为0.884 6 cm/h,  $D_0$  为2.631 8 cm<sup>2</sup>/h,  $\alpha$  为2.975 2 cm,可决系数  $R^2 = 0.997 0$ ,均方误差  $\text{MSE} = 0.575 4 \times 10^{-3}$ 。CXTFIT 2.0 软件的拟合结果与实测结果相关性很好。

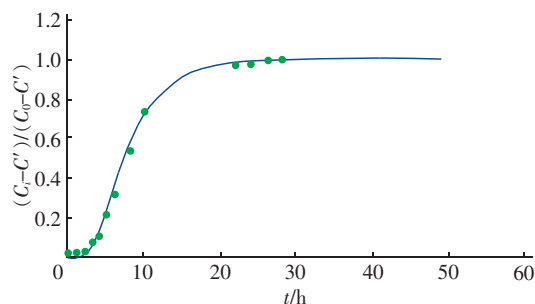


图2  $\text{Cl}^-$  穿透过程的拟合

Fig.2 Fitting of  $\text{Cl}^-$  penetration process

### 2.2 生物滞留池对径流污染物的去除效果

#### 2.2.1 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果

图3为实测的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  穿透过程以及在

CXTFIT 2.0 软件中采用不同的  $R_d$  对实测  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  穿透过程的拟合结果。可以看出,当  $R_d = 8$  时,对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  穿透过程的拟合效果最好,  $R^2 = 0.99$ 。

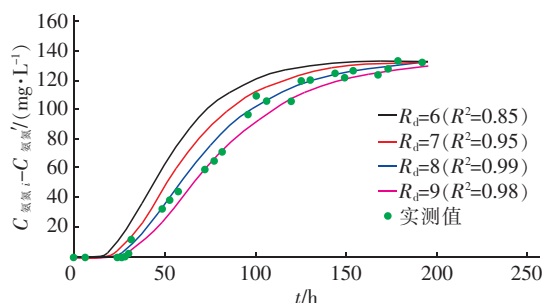


图3  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  穿透过程的拟合

Fig. 3 Fitting of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  penetration process

实测的生物滞留池出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度经历了3个变化阶段。第1阶段(0~30 h):出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度基本没有变化,稳定在零左右;第2阶段(30~120 h):出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度快速上升;第3阶段(120 h以后):出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度缓慢增长并趋于稳定,最终与进水浓度一致。在第1阶段,开始时填料层空隙里充满水分,进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度被稀释,且填料对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的吸附性较强,故出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度极低;在第2阶段,填料对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的吸附量逐渐接近饱和,出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度迅速升高;至第3阶段,填料对进水中的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  几乎无吸附作用,出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度与进水浓度基本相同。

利用 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温方程对填料吸附  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的试验数据进行线性拟合,结果表明, Freundlich 方程的拟合效果更好,  $R^2 = 0.98$ , 填料对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的吸附主要是以不均匀的吸附方式为主; Langmuir 方程拟合的  $R^2$  值为 0.62、吸附系数  $K_1$  为  $4.25 \times 10^{-3}$ , 说明填料对于  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的吸附属于有利吸附<sup>[6]</sup>。  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  自身带正电荷,土壤胶粒大多带负电荷,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  易被土壤颗粒吸附<sup>[7]</sup>。以砂和土壤混合物为填料的生物滞留池对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效果较好,且  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  在生物滞留池中的迁移过程主要受弥散、吸附-解吸等作用的影响。

## 2.2.2 对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除效果

图4是实测的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  穿透过程以及在 CXTFIT 2.0 软件中采用不同的  $R_d$  对实测  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  穿透过程的拟合结果。可以看出,当  $R_d = 0.8$  时,对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  穿透过程的拟合效果最好,  $R^2 = 0.95$ 。

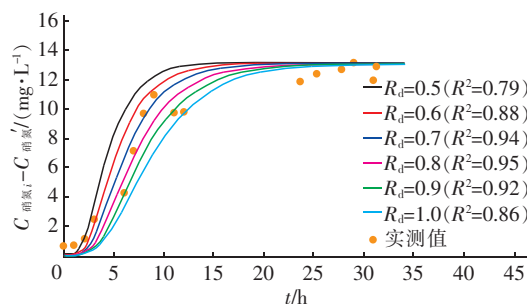


图4  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  穿透过程的拟合

Fig. 4 Fitting of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  penetration process

实测的生物滞留池出水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度同样经历了3个变化阶段。其中,在第2阶段(2~15 h)中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度的上升速率相比  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  要快得多,说明生物滞留池填料对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的吸附效果不理想。  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  分段穿透拟合的前10 h,  $R_d = 0.7$  时拟合效果最好,  $R^2 = 0.92$ ; 10 h之后,  $R_d = 1.0$  时拟合效果最好,  $R^2 = 0.75$ ; 而且随时间增加,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  运移的  $R_d$  值也在增加。由于穿透试验中土壤处于饱和状态,随时间的增加,饱和土壤中氧气减少,满足微生物反硝化所需的厌氧条件,小部分  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  发生反硝化作用<sup>[8]</sup>,导致拟合出的  $R_d$  值增大。

利用 Langmuir 和 Freundlich 方程对填料吸附  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的试验数据进行线性拟合。结果表明,两种方程的拟合效果都较差,  $R^2$  值分别为 0.24 和 0.06。 Langmuir 方程的拟合参数最大吸附量  $S_m$  仅为 1.33 mg/kg, 填料对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  几乎无吸附作用。

$\text{NO}_3^- - \text{N}$  去除效果不理想、不稳定的原因如下:一是填料对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除效果受水力停留时间的影响。  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  带有负电荷,土壤胶粒大多带负电荷,两种物质相互排斥。对比  $\text{Cl}^-$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的穿透时间,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的穿透时间小于  $\text{Cl}^-$  的穿透时间,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  在生物滞留池内的运移速度要快于水流渗流速度,同样反映出  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  极不容易被填料截留吸附,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  在生物滞留池内的水力停留时间非常短。因此,可通过向填料中添加带正电荷的物质,从而提高填料对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的吸附截留能力,增加停留时间,提高反硝化发生的几率。二是在实际降雨过程中,雨水在生物滞留池内停留的时间较短,生物滞留池难以长时间满足反硝化菌所需的厌氧条件,无法进行反硝化作用。 Kim 等通过提高出水口高度来创建厌氧区,以促进反硝化作用<sup>[9]</sup>。三



是生物滞留池填料吸附的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , 在有氧条件下被硝化为  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ , 导致  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的浓度升高<sup>[10]</sup>。因此, 长期去除  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  只能通过生物途径, 即通过植物的吸收或通过反硝化转化为气态氮<sup>[11]</sup>。

### 2.2.3 对 TP 的去除效果

图5是实测的 TP 穿透过程以及采用不同的  $R_d$  对实测 TP 穿透过程的拟合结果。可知, 当  $R_d = 7$  时, 对 TP 穿透过程的拟合效果最好,  $R^2 = 0.94$ 。

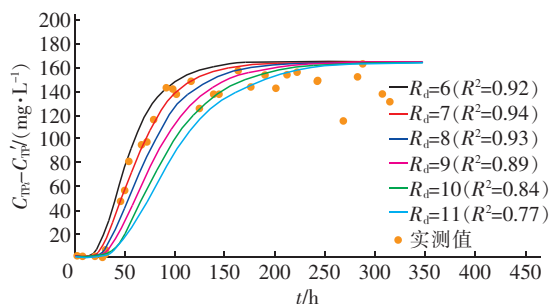


图5 TP 穿透过程的拟合

Fig. 5 Fitting of TP penetration process

实测的生物滞留池出水 TP 浓度变化同样经历了3个阶段。其中, 在第3阶段(250~300 h) TP 穿透过程的实测值出现减小、波动的现象, 可能是因为填料未完全与 TP 发生接触, 部分填料对 TP 仍有吸附作用。利用 Langmuir 和 Freundlich 方程对填料吸附 TP 的试验数据进行线性拟合。结果表明, 两种方程的拟合效果相同,  $R^2$  值均为 0.85。Langmuir 吸附方程的  $R^2 > 0.6$ 、吸附系数  $K_1$  为 0.02, 说明填料对 TP 的吸附反应属于有利吸附。填料对于 TP 的吸附主要是以不均匀的吸附方式为主。

Langmuir 方程对填料吸附 TP 试验数据的线性拟合最大吸附量  $S_m$  为 400 mg/kg, 所以生物滞留池填料对 TP 的吸附量达到饱和时需要更换填料。假设西安地区年均降雨量为 600 mm, 地表径流中的 TP 平均浓度为 2.5 mg/L, 西安地区某个生物滞留池运行 10 年需更换填料, 则该生物滞留池的设计填料层厚度至少需要 24 cm, 这对控制填料的更换时间和设计生物滞留池填料层厚度具有指导性意义。

## 3 结论

① CXTFIT 2.0 软件的拟合结果与实测结果相关性很好, 因此可以使用 CXTFIT 2.0 软件进行生物滞留池中氮和磷的运移预测和运移参数的测定。

② CXTFIT 2.0 软件对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和 TP 穿透过程拟合出的  $R_d$  越大, 生物滞留池对其去

除效果越好。其中, 生物滞留池对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效果最好,  $R_d = 8$ ; 对 TP 的去除效果较好,  $R_d = 7$ ; 对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除效果极其有限,  $R_d = 0.8$ 。砂土填料对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TP 的去除都是有利吸附, 且以不均匀吸附方式为主, 而对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  几乎无吸附作用。

③ 生物滞留池对地表径流污染物的排放有良好的控制效果, CXTFIT 2.0 软件的引入能更好地研究污染物的迁移转化规律, 为生物滞留池的合理设计提供理论依据。通过 CXTFIT 2.0 软件模拟来优化生物滞留池的设计, 并针对不同地区的不同地质类型, 设计出既经济合理又具有良好水质净化效果的生物滞留池将是今后的研究重点。

## 参考文献:

- [1] 孙艳伟, 魏晓妹, Pomeroy C A. 低影响发展的雨洪资源调控措施研究现状与展望[J]. 水科学进展, 2011, 22(2): 287-293.  
Sun Yanwei, Wei Xiaomei, Pomeroy C A. Review of current research and future directions of low impact development practices for storm water[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(2): 287-293 (in Chinese).
- [2] 许萍, 黄俊杰, 张建强, 等. 模拟生物滞留池强化径流雨水中的氮磷去除研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(2): 107-112.  
Xu Ping, Huang Junjie, Zhang Jianqiang, et al. Research on simultaneous removal of nitrogen and phosphorus in runoff rainwater by bioretention[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(2): 107-112 (in Chinese).
- [3] 胡爱兵, 李子富, 张书函, 等. 模拟生物滞留池净化城市机动车道路雨水径流[J]. 中国给水排水, 2012, 28(13): 75-79.  
Hu Aibing, Li Zifu, Zhang Shuhan, et al. Simulated bioretention pond for improving quality of stormwater runoff on urban traffic road[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(13): 75-79 (in Chinese).
- [4] Mastroicco M, Boz B, Colombani N, et al. Modelling groundwater residence time in a sub-irrigated buffer zone[J]. Ecohydrology, 2014, 7(3): 1054-1063.
- [5] 杨文涛, 刘春平, 文红艳. 一种估计溶质运移参数的统计-确定性方法[J]. 勘察科学技术, 2006(5): 16-19.  
Yang Wentao, Liu Chunping, Wen Hongyan. A statistic-determined method for estimation of solute transport

- parameters in porous media [J]. Site Investigation Science and Technology, 2006(5):16-19 (in Chinese).
- [6] 赵雪松, 胡小贞, 卢少勇, 等. 不同粒径方解石在不同 pH 值时对磷的等温吸附特征与吸附效果[J]. 环境科学学报, 2008, 28(9):1872-1877.
- Zhao Xuesong, Hu Xiaozhen, Lu Shaoyong, *et al.* Phosphorus sorption by natural calcite and the effects of pH and grain size [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(9):1872-1877 (in Chinese).
- [7] 卢少勇, 万正芬, 李锋民, 等. 29 种湿地填料对氨氮的吸附解吸性能比较[J]. 环境科学研究, 2016, 29(8):1187-1194.
- Lu Shaoyong, Wan Zhengfen, Li Fengmin, *et al.* Ammonia nitrogen adsorption and desorption characteristics of twenty-nine kinds of constructed wetland substrates [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(8):1187-1194 (in Chinese).
- [8] Zinger Y, Blecken G T, Fletcher T D, *et al.* Optimising nitrogen removal in existing stormwater biofilters: Benefits and tradeoffs of a retrofitted saturated zone[J]. Ecol Eng, 2013, 51:75-82.
- [9] Kim H, Seagren E A, Davis A P. Engineered bioretention for removal of nitrate from stormwater runoff[J]. Water Environ Res, 2003, 75(4):355-367.
- [10] Li L, Davis A P. Urban stormwater runoff nitrogen composition and fate in bioretention systems [J]. Environ Sci Technol, 2014, 48(6):3403-3410.
- [11] Hatt B E, Fletcher T D, Deletic A. Hydraulic and pollutant removal performance of fine media stormwater filtration systems[J]. Environ Sci Technol, 2008, 42(7):2535-2541.



作者简介:杨利伟(1971-),男,吉林辽源人,博士,讲师,主要从事水污染控制及雨水管理方面的研究。

E-mail:408802216@qq.com

收稿日期:2019-01-04

#### (上接第132页)

- 2016(1):35-38.
- Yu Rong, Zhao Dan, Liu Yuanbo, *et al.* The application of different LID measures of SWMM model in the drainage system in simulation [J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(1):35-38 (in Chinese).
- [4] 王婷, 刁秀媚, 刘俊, 等. 基于 SWMM 的老城区 LID 布设比例优化研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4):39-43.
- Wang Ting, Diao Xiumei, Liu Jun, *et al.* Optimization of LID layout proportions in old city area based on SWMM [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4):39-43 (in Chinese).
- [5] 刘兴坡. 基于径流系数的城市降雨径流模型参数校准方法[J]. 给水排水, 2009, 35(11):213-217.
- Liu Xingpo. Parameter calibration method for urban rainfall-runoff model based on runoff coefficient [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35(11):213-217 (in Chinese).
- [6] 王智勇, 王劲峰, 于静洁, 等. 河北省平原地区水资源利用的边际效益分析[J]. 地理学报, 2000, 55(3):318-328.
- Wang Zhiyong, Wang Jinfeng, Yu Jingjie, *et al.* Analysis on marginal revenues of water in Hebei Province [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(3):318-328 (in Chinese).



作者简介:高曼(1992-),女,天津人,硕士研究生,研究方向为污水处理与资源化。

E-mail:773603700@qq.com

收稿日期:2018-10-18