

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.11.011

# 人工湿地生物堵塞对污染物去除效果的影响

朱一璇<sup>1</sup>, 吴郑清<sup>2</sup>, 许仕荣<sup>1</sup>, 周永潮<sup>3</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 嘉兴市水利投资有限公司, 浙江 嘉兴 314001; 3. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 为研究人工湿地运行过程中生物堵塞对其除污能力的影响,建立了垂直流人工湿地模型,采用连续运行的方式,研究了细(装置1)、中(装置2)、粗(装置3)3种不同粒径砾石填料装置的COD去除率随渗透系数 $k$ 的变化规律,并以装置2为例,通过示踪实验考察生物堵塞过程中装置渗流水力特性的变化规律。结果表明,随着生物堵塞的发生,COD去除率随 $k$ 的下降前期总体较为稳定,运行24 d后呈明显下降趋势,下降率分别达到18.2%、22.8%、22.9%。通过对比堵塞过程中各装置的累积去除负荷发现,若以 $k=0.5$  cm/s为堵塞标准,装置3达到堵塞时的COD累积去除负荷最大,装置1最小。示踪实验结果表明,在生物堵塞初期,由于生物膜的积累使得流场分配更为均匀,真实水力停留时间变长,装置水力效率有所提升,这对装置的除污能力有利;而到运行后期,过量的生物堵塞物导致局部出现死水区,真实水力停留时间缩短,装置的水力效率明显下降,进而导致COD去除率下降。

**关键词:** 人工湿地; 生物堵塞; COD去除率; 水力特性

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)11-0069-06

## Effect of Bio-clogging on Removal of Pollutants in Constructed Wetland

ZHU Yi-xuan<sup>1</sup>, WU Zheng-qing<sup>2</sup>, XU Shi-rong<sup>1</sup>, ZHOU Yong-chao<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Jiaxing Water Conservancy Investment Co. Ltd., Jiaxing 314001, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** To investigate the effect of bio-clogging on pollutants removal capacity of constructed wetland, three vertical flow constructed wetlands with fine (device 1), medium (device 2) and coarse (device 3) packing media was established and operated continuously to reveal the variation law of COD removal rate with permeability coefficient ( $k$ ), and the seepage hydraulic characteristics of device 2 during bio-clogging was investigated by tracer experiment. With the occurrence of bio-clogging, the COD removal rate of the three devices was generally stable with the decrease of  $k$  in the early stage, and showed an obvious downward trend after 24 days of operation, in which the decreasing rates reached 18.2%, 22.8% and 22.9%, respectively. If  $k$  of 0.5 cm/s was selected as the clogging standard, the COD cumulative removal load in device 3 was the largest, while that of device 1 was the smallest. The tracer experiment results indicated that the accumulation of biofilm made the flow field more uniform and thus led to the

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07201004)

通信作者: 许仕荣 E-mail: hnxushirong@126.com

prolong of actual hydraulic retention time (AHRT) and improvement of hydraulic efficiency in the early stage, which was beneficial to the pollutants removal. However, in the later stage, excessive bio-clogging led to local dead zone, shortened the AHRT, and significantly decreased the hydraulic efficiency of the device, leading to the decrease of COD removal rate.

**Key words:** constructed wetland; bio-clogging; COD removal rate; hydraulic characteristics

人工湿地具有投资少、抗冲击负荷能力强、运行稳定以及与景观生态相容性高等优点,在国内外被广泛用于各种污废水处理、水体生态修复等领域<sup>[1]</sup>。人工湿地填料中的微生物在净水过程中起着至关重要的作用。但是,在工程应用中发现,过多的微生物积累会引起人工湿地的堵塞<sup>[2]</sup>。在人工湿地运行过程中,生物堵塞会造成污水短流、表面积水及蚊蝇滋生等环境问题,此外,还可能导致人工湿地的处理效率大大降低、使用寿命大幅缩短<sup>[3-4]</sup>。

近年来,许多学者对生物堵塞的机理进行了大量研究。Thullner等<sup>[5]</sup>认为生物堵塞主要是由于微生物及其代谢产物即胞外聚合物(EPS)的积累引起的;Hall-Stoodley等<sup>[6]</sup>认为生物膜的生长减少了湿地填料间的空隙总体积,并且降低了空隙的连通性。在此基础上,许多学者提出了一系列的解决方法,例如更换基质<sup>[7]</sup>、翻新填料<sup>[8]</sup>、对进水进行预处理<sup>[9]</sup>等。但这些方法或成本高昂,或易影响人工湿地的稳定运行。另外有一些学者提出了原位修复技术,例如,Li等<sup>[10]</sup>用蚯蚓来加速堵塞物的生物降解,但这种方法受到蚯蚓适应性的限制<sup>[11]</sup>;Tang等<sup>[12]</sup>利用结合了 $\alpha$ -葡糖淀粉酶和 $\beta$ -葡聚糖酶的酶制剂分解堵塞物中的EPS,使渗透系数提高了16倍。尽管如此,目前有关生物堵塞对人工湿地除污效果的影响规律与机制仍缺乏研究。为此,笔者建立了垂直流人工湿地模型,并采用连续运行的方式,研究了细(装置1)、中(装置2)、粗(装置3)3种不同粒径的砾石填料装置对COD的去除率与渗透系数 $k$ 的关系,并以装置2为例,通过示踪实验考察了生物堵塞过程中装置渗流水力特性的变化规律,以此探讨生物堵塞对COD去除负荷的影响机制,旨在为人工湿地的设计与运行提供理论支撑。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验装置

垂直流人工湿地实验装置如图1所示,装置主体由有机玻璃制成,整体高度为65 cm、直径为15

cm,填料高度为50 cm,距底部5 cm处设有隔板,底部上方3 cm处设有出水口。填料分别采用细颗粒(装置1)、中颗粒(装置2)和粗颗粒(装置3)砾石。装置置于露天地面上,每个装置均种植菖蒲,首先对植物进行预培养3个月,以保证装置中植物正常生长,从2017年10月开始运行,采用淹没进水方式,运行参数如下:装置1、2、3的填料粒径分别为2~4、5~6、6~8 mm,初始空隙率分别为38.4%、44.5%、47.9%,理论水力停留时间(HRT)分别为5.1、5.9、6.3 h,进水COD浓度均为 $(50\pm5)$  mg/L,进水流量均为10 mL/min、水力负荷均为 $0.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。进水采用人工配水,参考邵川<sup>[13]</sup>的配制方法,葡萄糖浓度为46.8 mg/L、 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 为9.5 mg/L、 $\text{KH}_2\text{PO}_4\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 为4.6 mg/L、 $\text{NaCl}$ 为15.9 mg/L、 $\text{KCl}$ 为15.9 mg/L、 $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为19.9 mg/L、 $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为0.6 mg/L。运行过程中对装置的 $k$ 值和进出水COD浓度进行定期检测,直到装置完全堵塞。

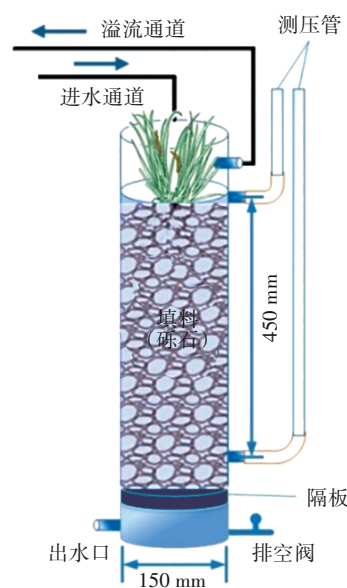


图1 垂直流人工湿地示意

Fig.1 Schematics of vertical-flow constructed wetland

### 1.2 渗透系数的测定

渗透系数 $k$ 采用达西公式计算。通过测定装置

两个测压管的液位差,再使用达西公式得出两测压管间填料的渗透系数,公式如下:

$$k = \frac{Q \times L}{A_w \times \Delta h} \quad (1)$$

式中: $k$ 为填料的饱和渗透系数,cm/s; $A_w$ 为过流面积,cm<sup>2</sup>; $Q$ 为流量,mL/s; $L$ 为两个测点之间的填料厚度,cm; $\Delta h$ 为两个测压管的液位差,cm。

### 1.3 COD的测定

以进水口的水样和填料深度45 cm处的水样分别作为进、出水水样,其COD浓度采用快速消解分光光度法测定,每4 d测一次,共检测12次。每个样品均测定两个平行样,取平均值作为实验结果。

### 1.4 水力特性的测定

选取装置2,测定运行第1、20、48天的水力特性。水力特性的检测采用示踪剂法<sup>[14]</sup>,以KBr为示踪剂,配制100 mL浓度为0.1 g/L的KBr溶液,通过脉冲方式将其在10 s内从进水端加入装置2。示踪实验流量设定为40 mL/min。在填料深度45 cm处的出水端采样,整个采样过程持续时间为3 h,每5 min在出口采集一次水样,一共采集37个样品。然后用离子色谱仪(DIONEX ICS-2000)测定水样中的Br<sup>-</sup>浓度。绘制示踪曲线,即各时间间隔点出水口的Br<sup>-</sup>浓度变化曲线。通过式(2)~(6)计算得到一系列水力特性参数:理论HRT( $t_n$ )、真实HRT( $t_m$ )、有效体积率( $e$ )、短流值( $S$ )和水力效率( $\lambda$ )<sup>[15]</sup>。理论HRT是指待处理污水在反应器内的平均停留时间。由于装置中水流流动路径不同,同一时刻的进水不会在同一时刻流出,而理论HRT并没有考虑这种情况。因此,为了得到真实HRT,需要借助示踪实验,通过式(3)计算得到。此外,随着堵塞的发生,装置中可能会出现死水区,有效体积率可以反映人工湿地内有效空隙的利用情况。短流值为Zhang等<sup>[15]</sup>提出的一种可以描述水力性能的参数。水力效率结合有效体积率的概念,可以反映装置内水流的有效利用情况。

$$t_n = \frac{V}{Q} \quad (2)$$

式中: $V$ 为装置内的空隙空间,mL; $Q$ 为流量,mL/min。

$$t_m = \frac{\int_0^\infty c(t)tdt}{\int_0^\infty c(t)dt} \quad (3)$$

式中: $c(t)$ 为出水口处示踪剂在 $t$ 时刻的浓度,mg/L; $t$ 为采样时所对应的时间,min; $dt$ 为两个采样之间的时间间隔,min。

$$e = \frac{t_m}{t_n} \quad (4)$$

$$S = \frac{t_{16}}{t_{50}} \quad (5)$$

式中: $t_{16}$ 为出水中示踪剂的量占示踪剂总量的比例为16%时的时间,min; $t_{50}$ 为出水中示踪剂的量占示踪剂总量的比例为50%时的时间,min。

$$\lambda = \frac{t_p}{t_n} \quad (6)$$

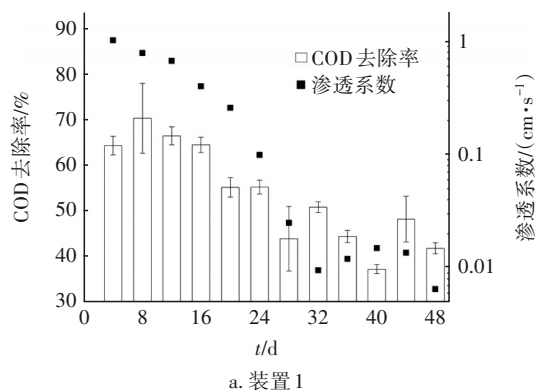
式中: $t_p$ 为示踪剂浓度峰值出现的时间,min。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 COD去除率与 $k$ 的关系

当3个装置均达到溢流状态(渗透系数 $k$ 达到0.08 cm/s左右)时,认为已发生堵塞,结束运行。3个装置中渗透系数 $k$ 值与COD去除率随运行时间的变化如图2所示。

在装置运行的前20 d,3个装置的渗透系数 $k$ 值均呈大幅下降趋势,此时装置内部具有足够的养分和生长空间,微生物处于指数生长状态,形成微生物菌落及生物膜等。运行20 d后,3组装置的渗透系数 $k$ 值逐渐趋于稳定,这是由于部分空隙被微生物菌落及其胞外聚合物占据,导致填料空隙率降低,Samsó等<sup>[16]</sup>研究表明,由于生物膜及不可降解的惰性物质在空隙中的堆积,空隙率下降将抑制微生物的生长,导致生物膜生长减慢。因此,渗透系数 $k$ 值的下降幅度进一步降低,并逐渐趋于稳定。由于细颗粒填料的空隙率较小,装置1的 $k$ 值在第28天降至0.025 cm/s,最先达到堵塞状态;装置2和装置3的 $k$ 值在第44天分别降至0.075和0.083 cm/s,达到堵塞状态。



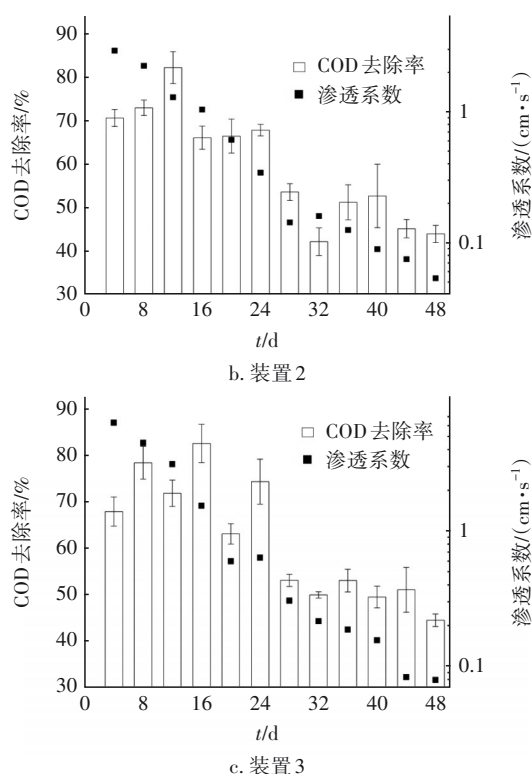


图2 COD去除率与渗透系数随时间的变化

Fig.2 Change of COD removal rate and hydraulic conductivity with time

值得注意的是,随着 $k$ 值的下降,3个装置的COD去除率也逐渐下降,这与Carrasco-Acosta等<sup>[17]</sup>和Vasconcellos等<sup>[18]</sup>的研究结果类似。装置1、2、3在前24 d的COD平均去除率分别为62.6%、70.9%、73.0%,在24~48 d的COD平均去除率分别为44.4%、48.1%、50.1%,下降幅度分别为18.2%、22.8%、22.9%。

## 2.2 $k$ 与COD累积去除负荷的关系

对于湿地系统来说,污染物的累积去除负荷是衡量其效能的一项重要指标。3个装置中 $k$ 值随COD累积去除负荷的变化见图3。随着COD累积去除负荷的增加,3个装置的 $k$ 值均急剧下降,当COD累积去除负荷达到1 000 mg时, $k$ 值均达到非常低的水平,此时生物膜对装置产生了明显的堵塞作用。对3组装置的 $k$ 值与COD累积去除负荷进行拟合发现,两者之间存在着明显的指数函数关系(见图3),其函数形式如下:

$$k = a + be^{-x/c} \quad (7)$$

式中: $x$ 为COD累积去除负荷,mg; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 均为常数,与湿地填料类型、植物特征等有关。

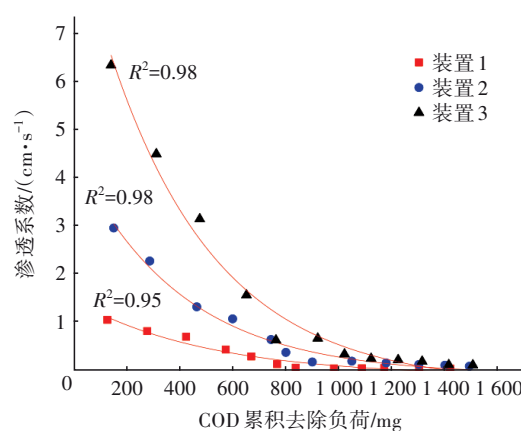


图3 COD累积去除负荷随渗透系数的变化

Fig.3 Change of COD cumulative removal load with hydraulic conductivity

由图3可知,当 $k$ 为0.5 cm/s时,装置1、2、3的COD累积去除负荷分别为451.1、798.6和1 007.4 mg;当 $k$ 达到0.025 cm/s时,装置1、2、3的COD累积去除负荷分别为1 099.1、1 362.0和1 151.6 mg。

## 2.3 堵塞过程中水力特性的变化

为考察堵塞过程中装置内部水流的水力特性变化,选取装置2进行示踪实验,得到的水力特性参数如表1所示。试验过程中,Br<sup>-</sup>回收率均高于80%,可认为结果可靠<sup>[19]</sup>。由表2可知,第20天出水中示踪剂浓度最高时的时间 $t_p$ 较第1天延长了9.1 min,这是由于生物堵塞物的累积,造成填料内部流场的重新分配,使得流场更为均匀,实际流动途径变长。同时发现,真实水力停留时间 $t_m$ 也由第1天的72.1 min延长到第20天的81.7 min,装置的有效体积率增大,水力效率提高。当运行到第48天时 $t_p$ 缩短至58.9 min,此时装置内部过量的生物堵塞导致局部死水区与短流区的出现,优势路径的存在使得流动路径缩短,真实水力停留时间 $t_m$ 也减少为70.5 min,装置的有效体积率也随之变小,水力效率随之降低,Liu等人<sup>[20]</sup>的研究也得出了类似的结果。

表1 装置2的水力特性参数

Tab.1 Hydraulic characteristic of device 2

项目	$t_n$ / min	$t_m$ / min	$t_{16}$ / min	$t_{50}$ / min	$S$	$e$	$t_p$ / min	$\lambda$
第1天	88.5	72.1	66.6	81.6	0.8	0.8	61.2	0.7
第20天	88.5	81.7	72.6	91.8	0.8	0.9	70.3	0.8
第48天	88.5	70.5	57.0	79.2	0.7	0.8	58.9	0.7



### 3 讨论

#### 3.1 生物堵塞对COD去除率的影响

随着 $k$ 值的下降,3个装置在运行初期COD去除率保持稳定,但随后逐渐下降(见图2),可能的原因是在运行初期,微生物呈对数生长,需要外界大量的养分,从而对COD的去除率维持在较高水平;而随着装置的运行,由于填料空间和营养的制约,微生物生长逐渐出现竞争而受到抑制,生长逐渐缓慢<sup>[21]</sup>,因此,实验后期COD去除率逐渐降低并趋于稳定。同时,通过示踪实验发现,COD去除率的降低也与填料内部水力特性的变化有关。对比装置的水力特性参数(见表1)发现,装置运行到第20天,装置的真实水力停留时间延长,保证了其较大的有效体积率和较高的水力效率;而运行到第48天,真实水力停留时间缩短,装置的有效体积率和水力效率随之降低。由此可见,前20 d适度的生物堵塞物累积造成装置内部流场的重新分配,延长了真实水力停留时间,这有利于COD的去除;而第48天,装置内部过量的生物堵塞,导致局部死水区和优势路径的出现(见图4),真实水力停留时间变短,短流现象发生,这使得后期COD去除率下降。综上可知,堵塞后水力性能的下降是人工湿地除污效果下降的主要原因之一。

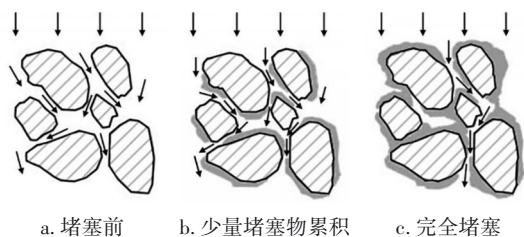


图4 装置内部生物堵塞物累积及水流通道变化过程示意

Fig.4 Schematics of bio-clogging accumulation and variation of water flow channels

#### 3.2 不同粒径填料堵塞规律对比

装置1在第28天时 $k$ 降至0.025 cm/s左右(见图2),最先达到堵塞状态,这主要是由于细颗粒间空隙平均体积较小,微生物生长在空隙中,较小空隙易优先堵塞,此后湿地内部水流会转移到更大的空隙,堵塞也从小的空隙转移到大空隙中<sup>[22]</sup>。观察3个装置的COD去除率可以发现,装置2和3的COD去除率高于装置1(见图2),这或许是因为细颗粒较易发生堵塞,堵塞后死水区的营养物质及溶解氧更新效率降低,影响了微生物的生长与降解性能<sup>[23]</sup>。

通过比较3个装置的COD累积去除负荷发现,以 $k=0.5$  cm/s为堵塞标准,当堵塞程度低于堵塞标准时,装置3的COD累积去除负荷最大(见图3),而装置1中堵塞发生得最快、COD累积去除负荷最低,因此,实际应用时应优化填料粒径的选择与布置。

### 4 结论

① 随着渗透系数的下降,COD去除率在前期较稳定,运行24 d后呈明显下降趋势。同时发现,COD去除率的下降与装置内水力特性的改变有关。

② 装置运行前期适度的生物堵塞物累积可优化水力效率,延长真实水力停留时间,促进COD的去除;堵塞后期,由于死水区、优势流动路径等的出现,真实水力停留时间缩短,有效体积率减小,水力效率降低,从而使COD去除率下降。

③ 通过比较3种不同粒径砾石填料装置的COD累积去除负荷可以发现,以 $k=0.5$  cm/s为堵塞标准时,从开始运行至堵塞的整个周期中,大粒径填料装置的COD累积去除负荷最大,而小粒径填料装置堵塞发生得最快,COD累积去除负荷最低。这对实际应用时填料粒径的选择具有一定参考意义。

### 参考文献:

- [1] XIE X L, HE F, XU D, *et al.* Application of large-scale integrated vertical-flow constructed wetland in Beijing Olympic Forest Park: design operation and performance [J]. *Water and Environment Journal*, 2012, 26 (1): 100-107.
- [2] DECHESNE M, BARRAUD S, BARDIN J P. Indicators for hydraulic and pollution retention assessment of stormwater infiltration basins [J]. *Journal of Environmental Management*, 2004, 71 (4): 371-380.
- [3] HUA G F, LI L, ZHAO Y Q, *et al.* An integrated model of substrate clogging in vertical flow constructed wetlands [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 119: 67-75.
- [4] PERUJO N, ROMANI A M, SANCHEZ-VILA X. A bilayer coarse-fine infiltration system minimizes bioclogging: the relevance of depth-dynamics [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 559-569.
- [5] THULLNER M, SCHROTH M H, ZEYER J, *et al.* Modeling of a microbial growth experiment with

- bioclogging in a two-dimensional saturated porous media flow field[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2004, 70(1/2):37-62.
- [6] HALL-STOODLEY L, COSTERTON J W, STOODLEY P. Bacterial biofilms: from the natural environment to infectious diseases[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2004, 2(2): 95-108.
- [7] NIVALA J, KNOWLES P, DOTRO G, *et al.* Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: measurement, modeling and management[J]. *Water Research*, 2012, 46(6): 1625-1640.
- [8] HUA G F, ZENG Y T, ZHAO Z W, *et al.* Applying a resting operation to alleviate bioclogging in vertical flow constructed wetlands: an experimental lab evaluation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 136: 47-53.
- [9] DE LA VARGA D, DÍAZ M A, RUIZ I, *et al.* Avoiding clogging in constructed wetlands by using anaerobic digesters as pre-treatment[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 52: 262-269.
- [10] LI H Z, WANG S, YE J F, *et al.* A practical method for the restoration of clogged rural vertical subsurface flow constructed wetlands for domestic wastewater treatment using earthworm[J]. *Water Science and Technology*, 2011, 63(2): 283-290.
- [11] DU M P, XU D, TRINH X T, *et al.* EPS solubilization treatment by applying the biosurfactant rhamnolipid to reduce clogging in constructed wetlands[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 218: 833-841.
- [12] TANG P, XIANG Z S, ZHOU Y C, *et al.* Enzyme treatment improves the performance of laboratory-scale vertical flow constructed wetland[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 268: 665-671.
- [13] 邵川. 颗粒填料生物滤池生物堵塞模型研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- SHAO Chuan. Study on Biological Clogging Model of Particle Packing Biofilter [D]. Nanjing: Nanjing University, 2017 (in Chinese).
- [14] HEADLEY T R, KADLEC R H. Conducting hydraulic tracer studies of constructed wetlands: a practical guide[J]. *Ecology & Hydrobiology*, 2007, 7 (3/4) : 269-282.
- [15] ZHANG L B, XING M Y, WU Y F, *et al.* Spatial distributions of biofilm properties and flow pattern in NiiMi process[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102 (2): 1406-1414.
- [16] SAMSO R, GARCIA J. The cartridge theory: a description of the functioning of horizontal subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment, based on modelling results [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 473/474: 651-658.
- [17] CARRASCO-ACOSTA M, GARCIA-JIMENEZ P, HERRERA-MELIAN J A, *et al.* The effects of plants on pollutant removal, clogging, and bacterial community structure in palm mulch-based vertical flow constructed wetlands[J]. *Sustainability*, 2019, 11: 632.
- [18] VASCONCELLOS G R, VON SPERLING M, OCAMPOS R S. From start-up to heavy clogging: performance evaluation of horizontal subsurface flow constructed wetlands during 10 years of operation[J]. *Water Science and Technology*, 2019, 79 (7) : 1231-1240.
- [19] 于博海. 人工湿地的堵塞规律研究及机理探讨[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- YU Bohai. Research on the Clogging Development and Mechanism of Constructed Wetlands [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016 (in Chinese).
- [20] LIU H Q, HU Z, JIANG L P, *et al.* Roles of carbon source-derived extracellular polymeric substances in solids accumulation and nutrient removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 362: 702-711.
- [21] STANESCU D, CHEN-CHARPENTIER B M. Random coefficient differential equation models for bacterial growth [J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2009, 50(5/6): 885-895.
- [22] MOSTAFA M, VAN GEEL P J. Conceptual models and simulations for biological clogging in unsaturated soils [J]. *Vadose Zone Journal*, 2007, 6(1): 175-185.
- [23] PERUJO N, SANCHEZ-VILA X, PROIA L, *et al.* Interaction between physical heterogeneity and microbial processes in subsurface sediments: a laboratory-scale column experiment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(11): 6110-6119.

作者简介: 朱一璇(1996-), 女, 安徽蚌埠人, 硕士研究生, 研究方向为水质净化与水污染控制。

E-mail: Yixuan\_Zhu716@163.com

收稿日期: 2019-12-09

修回日期: 2020-02-17

(编辑: 刘贵春)