

# 基于有效缓解基质堵塞的 IVCW 结构和工艺优化研究

黄福青<sup>1,2</sup>, 陈迪松<sup>1</sup>, 武俊梅<sup>1</sup>, 徐 栋<sup>1</sup>, 吴振斌<sup>1</sup>, 贺 锋<sup>1</sup>

(1. 中国科学院水生生物研究所 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 基质堵塞是潜流人工湿地在工程应用中面临的最严重的运行管理问题之一。围绕复合垂直流人工湿地(IVCW)基质堵塞问题,在系统分析导致基质堵塞的结构和工艺缺陷的基础上,研究了增加基质层深度以及增设备水管集水管和控制器的优化措施对缓解基质堵塞的效果。结果表明,结构和工艺的优化,克服了堵塞物质容易在下行池表层基质中较快累积的弊端,同时加快了堵塞物质的矿化分解。由初步的模型预测可见,结构和工艺的优化措施,使改进后的系统有效使用寿命延长至原有系统的2.77倍。

**关键词:** 复合垂直流人工湿地; 基质堵塞; 结构工艺优化

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2017)02-0031-06

## Optimization of Configuration and Process for Effectively Mitigating Substrate Clogging in Integrated Vertical-flow Constructed Wetland

HUANG Fu-qing<sup>1,2</sup>, CHEN Di-song<sup>1</sup>, WU Jun-mei<sup>1</sup>, XU Dong<sup>1</sup>, WU Zhen-bin<sup>1</sup>,  
HE Feng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Substrate clogging is one of the most frequently encountered problems in operation of subsurface-flow constructed wetlands (SFCW). Integrated vertical-flow constructed wetland (IVCW) is a typical SFCW consisted of two chambers, down-flow and up-flow in series. An anti-clogging solution was proposed from both configuration and process for an IVCW system by adjusting the substrate depth, introducing more distribution and catchment pipes and controllers. The results demonstrated that after the optimization of the configuration and process, the accumulation of clogging matters at the surface layer of the down-flow chamber became slow while the decomposition rate of clogging matters was accelerated. In addition, the results of the preliminarily modeling showed that the lifetime of the modified IVCW system could be prolonged to 2.77 times compared to the original IVCW system.

**Key words:** integrated vertical-flow constructed wetland; substrate clogging; optimization of configuration and process

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178452); 国家科技支撑计划项目(2012BAJ21B03-04); 国家水污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101007-005)

通信作者: 贺锋 E-mail: hefeng@ihb.ac.cn

复合垂直流人工湿地( IVCW) 能高效去除水中氮、磷、有机物等常规污染物,在国内外的污水处理项目中得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。与其他类型的潜流人工湿地类似,IVCW 在长期运行过程中同样面临基质堵塞问题<sup>[3]</sup>。随着堵塞的发生,基质的水力传导性能逐渐降低,初期造成污水无法在设定的时间内正常流入系统。严重情况下将导致床体长期淹水,继而发生臭味蚊蝇滋生等卫生问题,同时还会阻碍大气复氧,使得系统对污染物的净化效果降低<sup>[4-5]</sup>。通常认为,基质中固体物质的逐渐积累是堵塞发生的直接原因,堵塞发生的进程取决于堵塞物质累积速度和矿化分解速度之间的平衡过程<sup>[6]</sup>。

大量研究表明,基质堵塞是潜流人工湿地长效运行最具挑战性的难题<sup>[5]</sup>。针对这一问题,研究者主要从预处理阶段削减总悬浮固体的输入和堵塞后基质渗透能力的恢复两方面提出了一些预防和堵塞后续管理的措施<sup>[5]</sup>。然而从理论上而言,系统功能的有效发挥取决于系统的结构,结构是功能的基础<sup>[7]</sup>。对于人工湿地而言,基质堵塞的特性根本上取决于系统的结构设计和运行工艺状况<sup>[6]</sup>。因此从复合垂直流人工湿地自身结构和现有工艺出发,探索缓解基质堵塞的有效措施显得十分重要,而目前这方面的研究比较缺乏。

### 1 IVCW 现有结构和工艺研究

湿地的水流方式直接改变湿地的物理化学性质,如营养的有效性、基质氧浓度、基质盐度、pH 值,从而对系统的处理效果产生直接影响。IVCW 具有独特的下行流-上行流复合水流方式,其结构如图 1 所示。

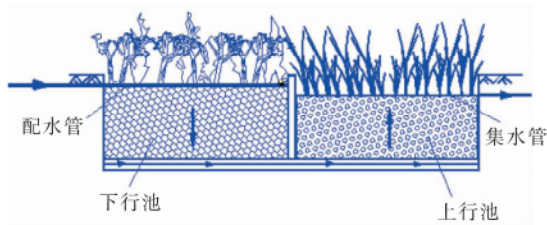


图 1 复合垂直流人工湿地  
Fig. 1 Schematic diagram of IVCW

IVCW 的基本流程是经预处理后的污水首先间歇流入位于下行池基质表面的多孔布水管,进水均匀分布在下行池的整个表面上,随后污水垂直向下流过下行池中的基质层。污水自下行池和上行池之间的穿孔隔墙流入上行池底部;并自动淹没上行池

的整个基质层,由位于上行池基质表面的多孔集水管均匀收集排出系统。污水由此完成下行池中下行流,上行池中上行流的复合水过程<sup>[8]</sup>。

IVCW 独特的下行流-上行流水流方式,一方面有效解决了其他类型的湿地易出现的水流短路问题,同时形成了下行流池部分区域好氧、上行流池部分区域缺氧的复合氧浓度梯度,促进了硝化反硝化作用<sup>[8]</sup>。然而,这种新型结构和工艺同时存在一定的弊端,在进水有机负荷过大时因易发生湿地基质表层堵塞,从而限制系统净化空间的充分利用和功能的有效发挥,具体表现在以下两个方面。

#### ① 下行池表层基质中堵塞物质的快速积累

詹德昊通过测定比较有机物的积累分布和基质渗透系数的变化,研究了 IVCW 小试系统基质堵塞发生的过程和规律<sup>[9]</sup>: 经过近五年的运行,小试系统下行池表层形成一层毯状的污泥层,阻碍了污水下渗,导致下行池表层长期积水。小试系统堵塞前后有机质分布和渗透系数的变化分别见图 2、3<sup>[9]</sup>。

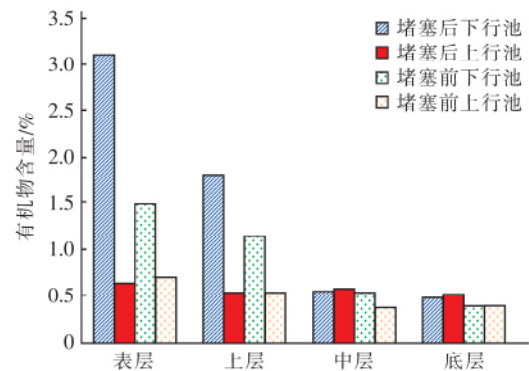


图 2 复合垂直流人工湿地小试系统有机物分布  
Fig. 2 Organic distribution in IVCW

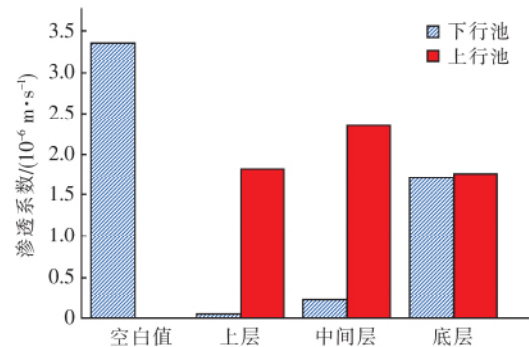


图 3 复合垂直流人工湿地小试系统堵塞后下行池和上行池渗透系数

Fig. 3 Comparison of infiltration coefficient for two chambers after clogging

分析结果表明,小试系统下行池有机物的含量显著高于上行池有机物含量( $p < 0.05$ ),并且下行池表层基质的有机物含量显著高于其他各层。下行池各层基质的渗透系数在堵塞后同堵塞前相比发生了极显著的降低( $p < 0.01$ ),同时,上行池各层基质的渗透系数在堵塞后有较小降低,但不显著。

上述研究结果表明,在现有的结构和工艺下运行的复合垂直流人工湿地会导致堵塞物质在下行池表层基质中较快积累,下行池表层基质是堵塞物质最容易积累的区域。

## ② 氧含量不足导致堵塞物质分解缓慢

堵塞物质在基质中的净累积速度,取决于堵塞物质的输入量(外部输入和内部内源)和输出量(矿化分解和随出水流出)之间的平衡过程<sup>[10]</sup>。在输入量和出水水质要求一定的情况下,基质堵塞进程的快慢取决于堵塞物质分解转化的速率。基质中的氧浓度与有机物的矿化分解过程关系密切<sup>[11]</sup>,提高氧含量可促进有机物的分解,减缓基质的有机质堵塞<sup>[12]</sup>。陶敏等<sup>[13]</sup>在研究中发现,IVCW 同其他类型的潜流人工湿地类似,同样面临溶解氧浓度偏低的问题。IVCW 下行池中的低溶解氧水平,是限制堵塞物质矿化分解的主要因素,从而加速了基质堵塞进程。

IVCW 基质堵塞的发生过程和规律,同其特定构造和工艺下形成的水流方式有密切的关系。由于污水首先被投配到下行池,在下行池由上至下的流动过程中,污水中大部分大颗粒的悬浮物由于沉淀和过滤作用被基质截留,同时污水中部分胶体物质也会由于沉淀、絮凝、离子交换等作用而停留在下行池基质中,并且表层基质的截留效应最为明显。流经下行池进入上行池中的有机物主要是一些可溶性的有机物,容易被系统中的微生物分解利用,或者随水流带出系统,不容易积累在上行池的基质中。同时下行池表层基质由于积累了丰富的营养物质,是藻类、湿地植物根系和微生物生长最活跃的区域,这些生命活动形成大量的生物量,继而深入影响基质堵塞的进程。

因此 IVCW 基质堵塞发生在下行池,并且具有距离基质表层越近堵塞越严重的规律。

针对 IVCW 基质堵塞的规律,要减缓 IVCW 系统的堵塞进程,必须从优化堵塞物质的分布累积模式以减缓表层基质堵塞物质累积速率和提高表层基

质溶氧水平以加快堵塞物质的分解转化两方面为出发点,寻求结构和工艺的优化措施,以延长系统的使用寿命。

## 2 IVCW 结构和工艺优化措施

为了优化堵塞物质的分布累积特性和提高基质溶解氧水平,提出了如下的结构和工艺优化措施。

结构改进的方法如下:①增加复合垂直流人工湿地下行池中基质的填充深度;②复合垂直流人工湿地上行池的集水管下移至距表层 20 cm 深度处;③在复合垂直流人工湿地上行池基质表层增加配水管;④在复合垂直流人工湿地下行池表层配水管下方 20 cm 深度处安装集水管;⑤通过安装自动控制器控制阀门的开合。改进后系统的结构见图 4。

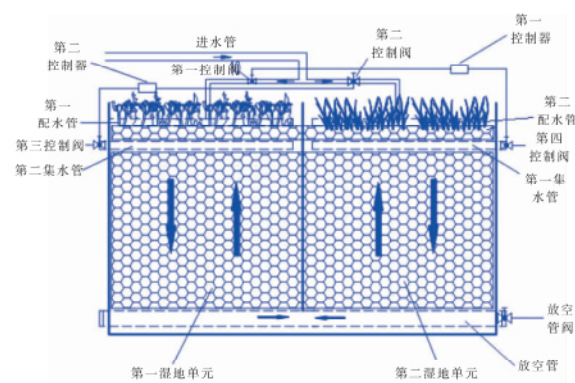


图 4 改进后的复合垂直流人工湿地示意

Fig. 4 Schematic diagram of modified IVCW

改进后的系统可通过控制器控制阀门的开合,实现系统周期性的双向布配水。包括以下两步:

① 污水由水泵提升进入进水管,第一控制器控制第一控制阀和第四控制阀打开,第二控制器控制第二控制阀和第三控制阀关闭,污水进入第一配水管后开始配水,在重力作用下污水到达第一湿地单元底部后经隔墙上的连通孔流入第二湿地单元底部,并继续向上流经第二湿地单元后由第一集水管收集排走,第一配水管工作预定时间后进入下一步;

② 第一控制器控制第一控制阀和第四控制阀关闭,第二控制器控制第二控制阀和第三控制阀打开,污水进入第二配水管配水,在重力作用下污水到达第二湿地单元底部后经隔墙上的连通孔流入第一湿地单元底部,并继续向上流经第一湿地单元,由第二集水管收集排走,第二配水管工作预定时间后返回步骤①进行循环,直至污水处理完成或到达预定



的污水处理时间长度。

### 3 结构和工艺优化评价

#### 3.1 结构和工艺优化对缓解基质堵塞效果的分析

##### ① 优化了堵塞物质在基质中的累积分布模式

IVCW 系统基质堵塞的发生过程和规律,同其构造和水流方式密切相关。由于污水首先由下行池基质表面的配水管始终在固定位点投配,在下行池由上至下的流动过程中,污水中大部分大颗粒的悬浮物和胶体物质由于沉淀过滤絮凝作用被下行池表层基质截留,使得堵塞物质在下行池表层基质中较快积累<sup>[9]</sup>。

改进后系统中的水流流态由原来固定进水的单一推流式转变为不断变化的多点进水的复杂流态。具体而言,通过控制器的控制,污水将自动实现由第一配水管和第二配水管周期性交互式布配水。这种周期性改变的双向布水方式,将使得污水中的污染物相对均匀分布于两池,进而显著减缓堵塞物质在原有系统下行池表层基质中的生成累积速度。同时污水在系统内的双向流动,将对截留在基质孔隙中的堵塞物质产生一定的反向冲刷作用,减缓基质表面稳定性堵塞物的生成和累积,从而有效缓解基质孔隙率的下降和堵塞的发生<sup>[14]</sup>。

##### ② 加速了基质中堵塞物质的分解转化

基质堵塞进程的快慢主要取决于堵塞物质分解转化的速率。基质中的氧含量同有机物的矿化分解过程关系密切<sup>[11]</sup>。在原有系统中,当系统进水时,两池的表层基质都处于饱和状态,停止进水时,仅下行池的表层处于不饱和状态;而在改进后的系统中,任何一个配水管开始进水,总存在一池的表层基质处于不饱和状态,停止进水时两池的表层基质都处于不饱和状态,这种不饱和状态的存在将大大增强大气复氧<sup>[15]</sup>,进而促进基质中堵塞物质的矿化分解。

同时在两套配水管道交替布水的工况下,两池中表层基质处于不饱和状态下的时间大大延长,有助于表层基质中累积的堵塞物的分解转化,从而有效改善原有系统中下行池表层随运行时间的延长较快发生堵塞的弊端,使得系统的服务年限大大延长。

当系统表层基质发生堵塞后,通过调节控制器,可以实现系统中污水在一定时间内的单向流动,使无水流流过的一池表层堵塞基质通过自然降解得到有效恢复<sup>[16]</sup>,而不影响系统功能的正常发挥。

#### 3.2 模型评价

通过建立人工湿地基质堵塞的数学模型,一方面能够预测湿地发生堵塞的时间,同时能够揭示影响基质堵塞的运行和管理因素<sup>[5]</sup>。根据复杂程度的不同,已经建立的堵塞模型包括以下两类:第一类为基于系统进水中悬浮固体负荷建立的模型;第二类为同时考虑其他因素(如生物膜的增殖和化学沉淀过程)建立的模型。第一类模型因为只需要水力负荷、悬浮固体浓度等少量的参数,应用简单,在实际中得到较广泛的应用,并被证明具有良好的实用性<sup>[17,18]</sup>。Zhao 等<sup>[17]</sup>在研究处理养殖废水的垂直流人工湿地的堵塞过程中,以悬浮物(SS)为因素建立了堵塞模型,并利用实验数据对模型的预测结果进行了验证,证明该模型具有较好的实用性。本研究参考上述模型,对比研究结构工艺优化措施对缓解复合垂直流人工湿地(IVCW)系统基质堵塞的效果。模拟过程如下。

系统运行前基质的有效容积  $V_0$ :

$$V_0 = \varepsilon h A \quad (1)$$

式中  $\varepsilon$ ——运行前基质的孔隙率

$h$ ——基质堵塞的深度,  $\mu\text{m}$

$A$ ——湿地的面积,  $\mu\text{m}^2$

系统运行  $t$  天基质截留的悬浮物体积  $V_{\text{ts}}$ :

$$V_{\text{ts}} = \frac{Q(C_0 - C_e)}{\rho_s(1 - \text{MC})} \cdot t \quad (2)$$

式中  $Q$ ——系统每天处理的污水体积,  $\text{L}/\text{d}$

$C_0$ 、 $C_e$ ——分别为进水和出水中悬浮物(SS)的浓度,  $\text{mg}/\text{L}$

$\rho_s$ ——悬浮物(SS)的密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$

MC——悬浮物(SS)的含水量, %

系统运行  $t$  天时基质的有效容积  $V_1$ :

$$V_1 = V_0 - (1 - k_1 k_2) \cdot V_{\text{ts}} \quad (3)$$

式中  $k_1$ ——悬浮物中有机质的比例, %

$k_2$ ——总有机悬浮物中可生物降解的比例, %

当堵塞发生时,即湿地系统内基质的有效容积降至零,也就是式(3)中  $V_1 = 0$ ,并将式(1)和式(2)代入式(3)中,则可推导出系统堵塞发生时间:

$$t_c = t = \varepsilon h A \cdot \frac{\rho_s(1 - \text{MC})}{(1 - k_1 k_2) \cdot Q(C_0 - C_e)} \quad (4)$$

改进前的系统堵塞发生时间:

$$t_{c前} = t = \varepsilon h A_{前} \cdot \frac{\rho_s(1 - MC)}{[1 - (k_1 k_2)_{前}] \cdot Q(C_0 - C_e)} \quad (5)$$

改进后的系统堵塞发生时间:

$$t_{c后} = t = \varepsilon h A_{后} \cdot \frac{\rho_s(1 - MC)}{[1 - (k_1 k_2)_{后}] \cdot Q(C_0 - C_e)} \quad (6)$$

则有:

$$\frac{t_{c后}}{t_{c前}} = \frac{A_{后} \cdot [1 - (k_1 k_2)_{前}]}{A_{前} \cdot [1 - (k_1 k_2)_{后}]} \quad (7)$$

对于处理农场废水的 IVCW, 处理水量均为  $Q$ , 运行工况为连续运行, 改进前的 IVCW 下行池和上行池的面积均为  $1 \text{ m}^2$ , 改进后的 IVCW 第一湿地单元和第二湿地单元的面积也同为  $1 \text{ m}^2$ 。改进前和改进后系统的差别在于改进前的系统持续由下行池表层的配水管配水, 而改进后的系统则是两套布配水系统交替运行, 交替周期为 1 天。这意味着改进后的系统第一池和第二池中的  $0 \sim 20 \text{ cm}$  深度间基质是以 1 天运行 1 天轮休的模式运行。

李怀正等<sup>[18]</sup>研究表明, 短期轮床(1 天)后的垂直流人工湿地表层到  $30 \text{ cm}$  基质层内的不可滤物质(SS)含量比轮休前平均减少了 15%。由于改进前的系统中污水一直在下行池表层开始投配, 仅下行池基质能够贡献有效容积容纳总悬浮物即  $A_{前} = 1 \text{ m}^2$ , 而改进后的系统, 污水交替在第一湿地单元和第二湿地单元的表层投配, 故第一湿地单元和第二湿地单元均能够贡献有效容积容纳总悬浮物即  $A_{后} = 2 \text{ m}^2$ 。则对于改进前的系统, 有  $(k_1 k_2)_{前} = 80\% \times 90\% = 72\%$ ; 对于改进后的系统, 有  $(k_1 k_2)_{后} = (k_1 k_2)_{前} + 15\% = 87\%$ 。

将  $(k_1 k_2)_{前} = 72\%$ ,  $(k_1 k_2)_{后} = 87\%$ ,  $A_{前} = 1 \text{ m}^2$ ,  $A_{后} = 2 \text{ m}^2$  代入式(7), 得到  $t_{c后} = 2.77 t_{c前}$ 。

即改进后的系统基质堵塞发生需要的时间是改进前系统的 2.77 倍, 表明经过结构和工艺的优化措施, 能够使系统的有效使用寿命延长至改进前的 2.77 倍。上述结构和工艺优化措施对于大规模的复合 IVCW 基质堵塞的缓解效果有待深入的研究。

#### 4 结论

IVCW 现有结构的工艺特点存在配水方式单一, 系统净化空间不能充分利用的弊端, 是造成基质堵塞较快发生的原因。通过增加基质层深度以及增设配水管集水管和控制器, 改善了 IVCW 堵塞物在基

质中的分布模式, 从而减缓了下行池表层基质中堵塞物质的积累速度; 同时提高了床体的复氧能力, 加快了堵塞物质的分解。堵塞模型预测结果表明, 改进后的系统有效使用寿命延长至原有系统的 2.77 倍。

#### 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 Environ J* 2012, 26(1): 100 - 107.
- [2] Alexandros S, Christos S A, Vassilios A T. Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment [M]. US: Elsevier, 2014.
- [3] 詹德昊, 吴振斌, 张晟, 等. 堵塞对复合垂直流湿地水力特征的影响 [J]. *中国给水排水* 2003, 19(2): 1 - 4.
- [4] Rajabzadeh A R, Legge R L, Weber K P. Multiphysics modelling of flow dynamics, biofilm development and wastewater treatment in a subsurface vertical flow constructed wetland mesocosm [J]. *Ecol Eng* 2015, 74: 107 - 116.
- [5] Nivala J, Knowles P, Dotro G, et al. Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: measurement, modeling and management [J]. *Water Res*, 2012, 46(6): 1625 - 1640.
- [6] Knowles P, Dotro G, Nivala J, et al. Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: occurrence and contributing factors [J]. *Ecol Eng* 2011, 37(2): 99 - 112.
- [7] 戈峰. 现代生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [8] 吴振斌. 复合垂直流人工湿地 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [9] 詹德昊, 吴振斌, 徐光来. 复合垂直流构建湿地中有机质积累与基质堵塞 [J]. *中国环境科学* 2003, (5): 10 - 14.
- [10] Tanner C C, Sukias J P S, Upsdell M P. Organic matter accumulation during maturation of gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters [J]. *Water Res*, 1998, 32(10): 3046 - 3054.
- [11] 鄢璐, 王世和, 维维国, 等. 运行条件下潜流型人工湿地溶氧状态研究 [J]. *环境科学* 2006, 27(10): 2009 - 2013.
- [12] Chazarenc F, Gagnon V, Comeau Y, et al. Effect of plant and artificial aeration on solids accumulation and biologi-

- cal activities in constructed wetlands [J]. *Ecol Eng*, 2009, 35(6): 1005 - 1010.
- [13] 陶敏, 贺锋, 徐栋, 等. 复合垂直流人工湿地氧化还原特征及不同功能区净化作用研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(2): 291 - 294.
- [14] 马飞, 蒋莉, 熊洁羽, 等. 反冲洗措施改善垂直潜流人工湿地水力特性的研究[J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(7): 46 - 49.
- [15] Colmer T D. Long-distance transport of gases in plants: a perspective on internal aeration and radial oxygen loss from roots [J]. *Plant Cell Environ*, 2003, 26(1): 17 - 36.
- [16] 熊佐芳, 洗萍, 周云新, 等. 自然导气措施对垂直流人工湿地堵塞的影响[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(13): 26 - 28.
- [17] Zhao Y Q, Sun G, Allen S J. Anti-sized reed bed system for animal wastewater treatment: a comparative study [J]. *Water Res*, 2004, 38(12): 2907 - 2917.
- [18] 李怀正, 叶建锋, 徐祖信. 轮休措施对堵塞型垂直潜

流人工湿地的影响[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(8): 1555 - 1560.



作者简介: 黄福青(1988 - ), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 主要从事水生态工程研究工作。

E-mail: huangfuqing@yeah.net

收稿日期: 2016 - 06 - 16

(上接第30页)

## 5 结语

海绵城市是生态文明在城市雨水管理方面的具体体现, 是和国际先进雨水管理理念接轨的中国智慧, 是解决城市雨水问题的可持续发展之路, 是保持可持续性、弹性、宜居性的必然选择。任一城市的海绵城市的建设宜从大局入手, 先考虑“山、水、海、林、田、湖”这些“大海绵”的构建, 再考虑绿色屋顶、透水铺装、下凹式绿地这些“小海绵”的建设。

今天大规模快速的海绵城市建设需要冷静思考一些基本而非常关键的问题。以厦门为例, 应充分评估适宜厦门海绵城市的近远期建设目标, 科学研究, 拟定适宜的控制指标体系, 从宏观至局部, 制定融合排水防涝、径流污染控制、水资源利用和水生态构建综合目标的工程体系和保障工程建设的管理机制。城市建设从局部至全流域不断改变地形地貌和雨水的产汇流规律, 只有在城市规划、设计、建设过程中, 真正应用遵循自然规律的科学体系, 城市的改造和建设才能取得更好的可持续发展。片面、粗放的问题理解和技术手段, 恐怕难以应对当今复杂的城市水生态挑战和大量雨水源头控制 LID 设施合理应用的精细设计。

## 参考文献:

- [1] 车伍, 张鲲, 赵杨. 我国排水防涝及海绵城市建设中若干问题分析[J]. *建设科技*, 2015, (1): 22 - 25.
- [2] 车伍, 杨正, 赵杨, 等. 中国城市内涝防治与大小排水系统分析[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(16): 13 - 19.



作者简介: 杨一夫(1984 - ), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士, 工程师, 主要从事低影响开发及海绵城市规划研究工作。

E-mail: 45098396@qq.com

收稿日期: 2016 - 04 - 16