

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.02.004

生物滞留槽快速设计方法及实例研究

刘增超^{1,2}, 李家科¹, 蒋春博¹, 李怀恩¹, 黄宁俊³

(1. 西安理工大学 陕西省西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048;

2. 西安工业大学 材料与化工学院, 陕西 西安 710021; 3. 西安市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068)

摘要: 为便于生物滞留技术在海绵城市建设中的推广应用,提出了一种生物滞留槽快速设计方法——汇流比速算法,本方法基于水量平衡原理,综合考虑了降雨量,降雨历时,下垫面类型,滞留槽表面蓄水层深度、填料渗透性能和储水性能、植被密度等因素对生物滞留槽调控效应的影响,同时避免了复杂的设计计算。据此方法设计建造的生物滞留槽实际运行监测结果表明,生物滞留槽对道路径流调控效果明显,其对中小型降雨的径流量削减率维持在80%以上,径流中主要污染物负荷削减率在85%以上,采用汇流比速算法设计生物滞留槽方法简便,效果可靠。

关键词: 海绵城市; 降雨; 生物滞留; 汇流比; 速算法

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2017)02-0145-07

Rapid design and example research on bioretention groove

LIU Zengchao^{1,2}, LI Jiake¹, JIANG Chunbo¹, LI Huaien¹, HUANG Ningjun³

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, China; 2. School of Materials Science and Chemical Engineering, Xi'an Technological

University, Xi'an 710021, China; 3. Xi'an Municipal Design Institute Limited Company, Xi'an 710068, China)

Abstract: In order to facilitate the application of bioretention technology in the construction of sponge city, the confluence ratio rapid algorithm is proposed as a kind of bioretention groove design method. This method is based on the principle of water balance, considering the influence of such factors as rainfall, rainfall duration, underlying surface types, bioretention surface storage layer depth, fillers permeability and water storage properties, vegetation density on the regulation effects of bioretention groove, to avoid the complex calculation and design. A set of bioretention grooves is designed and built by this method. The actual operation results show that the road runoff regulation effect of the bioretention groove is of significance. The runoff reduction rates of medium and small rainfall events are maintained at more than 80%, with the main pollutant load reduction rates greater than 85%. It also indicates that the confluence ratio rapid algorithm for bioretention design is more simple and effective.

Key words: sponge city; rainfall; bioretention; confluence ratio; rapid algorithm

“海绵城市”有望缓解目前我国城市内涝、降雨径流污染、水资源短缺、城市热岛效应等系列生态环境问题,目前正在国内多个城市开展试点建设。生物滞留技术作为海绵城市建设所采用的主要低影响开发(Low Impact Development, LID)技术之一^[1],其具有削减径流洪峰流量、净化径流污染、涵养地下

水源、改善城市水环境质量环境等功能。

生物滞留技术在美国、澳大利亚、新加坡等发达国家研究工作起步较早,代表性的研究机构和学者有美国马里兰大学 Davis^[2]、北卡罗来纳州立大学 Hunt^[3]、康涅狄格大学 Clausen^[4]、澳大利亚莫纳什大学 Hatt^[5]等人,这些研究机构和学者已逐步形成

收稿日期: 2016-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51279158);陕西省自然科学基金重点资助项目(2015JZ013);陕西省西咸新区沣西新城雨水净化与利用技术研究与应用示范项目(2012610001004149)

作者简介: 刘增超,男,讲师,博士生,研究方向为雨水资源化及其利用。E-mail:liuzengchao@163.com

通讯作者: 李家科,男,教授,博导,研究方向为非点源污染及水资源保护。E-mail:xaut_ljk@163.com

了较为完备的技术体系,但也存在某些设计缺陷^[6]。在国内该技术尚属新兴课题,向璐璐^[7]等根据多个地方的生物滞留池建造特点,基于水量平衡对生物滞留池设计方法进行了理论探析;潘国艳^[8]等通过模拟实验研究了生物滞留池的入流和出流过程,以及生物滞留池对雨水径流的削减效应;孟莹莹^[9]等针对生物滞留池构型设计参数做了探讨。

国内外有关生物滞留系统设计常采用的方法有渗滤法、有效容积法、完全水量平衡法等^[7]。在设计生物滞留槽时,渗滤法忽略了填料空隙储水量以及植被对蓄水层的影响;有效容积法未考虑设施的渗透能力和空隙储水量;完全水量平衡法虽理论上较合理,但计算过程复杂,一般工程人员难以掌握运用,基于此,本文在该设计方法基础上,综合考虑了降雨量、降雨历时、下垫面类型、蓄水层深度、渗透性能、填料储水性能、植被种植密度等因素,以西安地区为例,提出汇流比速算法来进行生物滞留槽快速设计,并对按此方法建造的生物滞留槽调控效果开展了相关的现场研究工作。

1 生物滞留槽布置方式和系统结构

生物滞留槽设施一般包括入流系统、溢流系统、蓄水层、覆盖层、植被层、种植土层、填料层、穿孔管及砾石排水层等,其常设在城市硬化道路周边,可单边进水亦可双边进水。布置方式可参考图1,剖面结构如图2所示。

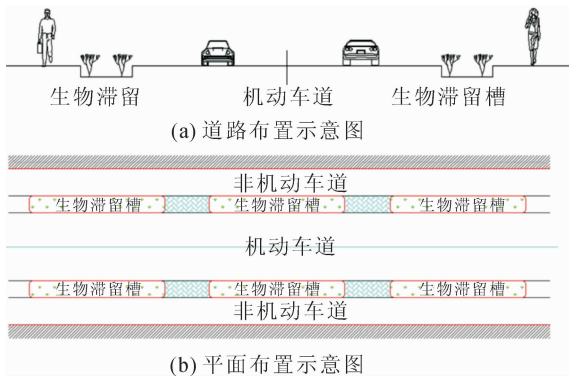


图1 生物滞留槽布置示意图

Fig.1 Bioretention groove layout

一般生物滞留槽设施自上而下依次为蓄水层、覆盖层、植被层、种植土层、特殊填料层、砾石排水层等。蓄水层主要功能是在降雨时临时蓄存雨水;覆盖层主要目的是降低表层土壤蒸发量及防止表层土壤过度冲刷;植被层主要起着吸收和净化污染物的重要作用,还可提高土壤下渗性能^[10];种植土层主要为植被提供生长介质、吸附污染物及储存部分径

流;因原状土渗透系数较小,通过设置特殊填料层即对原状土进行换填以增加装置的渗透性能,同时还可增加污染物的吸附净化性能;砾石层主要目的在于快速收集并排除下渗雨水。各层之间铺设透水土工布目的在于保证各层之间有较为明显的分界面,以防止各层材料流失、迁移^[11]。

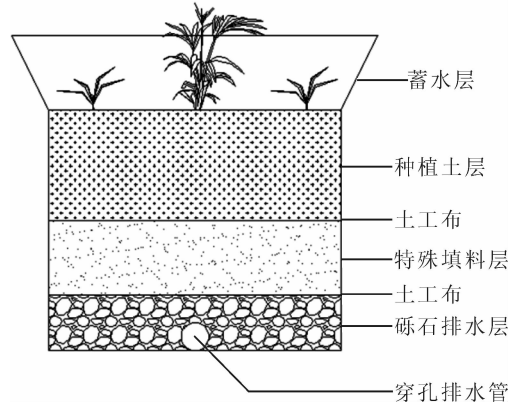


图2 生物滞留槽剖面结构示意图

Fig.2 Bioretention groove profile structure

2 生物滞留槽设计方法——汇流比法

低影响开发雨水系统常通过径流总量控制实现径流污染控制及雨水资源化利用目的,而径流总量控制目标往往与设计降雨量一一对应^[1]。故生物滞留槽设计时,首先需明确最大设计降雨量,而对大于生物滞留槽最大消纳能力部分的径流,常需设溢流管路,将之排至城市雨水管网。考虑到生物滞留槽消纳的降雨量越大,其场地面积一般也会越大,建造成本必然随之上升,在道路生物滞留槽设计时,其径流控制目标对应降雨量常取2~5a重现期的降雨量值,特别重要道路、短期积水严重道路降雨重现期可酌情增加。

2.1 生物滞留槽表面积计算

1) 水量平衡关系

通常降雨时段的蒸发量往往忽略不计,根据生物滞留设施内水量平衡原理,设计的最大可消纳径流量、表层蓄水量、空隙储水量、下渗水量之间的关系^[12]可由下式计算:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (1)$$

式中: Q 、 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 分别为生物滞留槽设计最大消纳径流量(m^3)、表层蓄水量(m^3)、下渗水量(m^3)、空隙储水量(m^3)。

2) 设计最大消纳径流量

生物滞留槽可完全消纳的最大设计径流量^[12]为:

$$Q = \varphi AH \quad (2)$$

式中: φ 为汇水区域平均径流系数; A 为设计道路区域内总汇水面积(m^2); H 为径流可完全消纳时对应的设计降雨量(m)。

低影响设施设计降雨量一般应在明确径流控制目标后通过当地30年以上日降雨资料统计数据获取^[1];在历年降雨资料匮乏的情况下,可参照建筑与小区渗透设施雨水入流两量中降雨量的计算方法,即采用降雨强度与降雨历时的乘积计算降雨量,一般降雨历时选取时不宜超过120 min^[13]。本文中设计降雨量采用后者进行计算,如式(3)~(5)所示:

$$i = \frac{a(1 + c \lg P)}{(T + b)^n} \quad (3)$$

$$i = \frac{1000H}{T} \quad (4)$$

$$H = \frac{1}{1000} iT \quad (5)$$

式中: i 为设计降雨强度(mm/min); P 为设计降雨重现期(a); T 为降雨历时(min); a 、 b 、 c 、 n 为地方参数。

3) 表层蓄水量

当流入生物滞留槽的径流量大于同时段的渗透量时,则其表层会形成蓄水层。其表层蓄水量^[7]可由式(6)计算:

$$Q_1 = hA_B(1 - f) \quad (6)$$

式中: A_B 为生物滞留槽表面积(m^2); h 为表面蓄水层最大设计深度(m),一般常取为0.1~0.3 m; f 为植株横截面积占蓄水层表面积的百分比。

4) 下渗水量

计算时段生物滞留槽的下渗水量^[7]可由式(7)计算:

$$Q_2 = vA_B T = \frac{60K(D_B + 0.5h)A_B T}{D_B} \quad (7)$$

式中: v 为下渗速度(m/min); K 为渗透系数(m/s); D_B 为不含表面蓄水层时生物滞留槽总深度(m)。

5) 空隙储水量

由于生物滞留槽种植土层、填料层、砾石层等都有一定的空隙,可储存一部分径流,其储存量^[7]可由式(8)计算:

$$Q_3 = \theta A_B D_B \quad (8)$$

式中: θ 为填料层空隙率,对沙土类可取0.05,炉渣可取0.15。

将式(1)、(2)、(6)、(7)、(8)联立,即可求出生物滞留槽表面积为:

$$A_B = \frac{\varphi A H D_B}{60K(h + D_B)T + \theta D_B^2 + h D_B(1 - f)} \quad (9)$$

2.2 汇流比速算表

令 N 为除生物滞留槽面积之外的汇水区面积与生物滞留槽面积之比,简称汇流比,则有:

$$N = \frac{A - A_B}{A_B} \quad (10)$$

$$A_B = \frac{A}{N + 1} \quad (11)$$

$$N = \frac{60K(0.5h + D_B)T + \theta D_B^2 + h D_B(1 - f) - \varphi H D_B}{\varphi H D_B} \quad (12)$$

由于式(12)形式较为复杂,且包含参数较多,对于普通工程人员而言,难以理解亦难以运用。故以下内容将通过典型工况进行计算,并提炼出汇流比速算表,以供工程人员查询使用。

对于道路型生物滞留设施,其汇流区径流系数 φ 常取0.9;其表层最大蓄水深度 h 宜取10~30 cm,工程设计时常取20 cm;对于以沙、土为主的填料,其混合组成空隙率 θ 可取0.05;当表层蓄水时,植物所占体积必须加以考虑,植株横截面积占蓄水层表面积的百分比 f 常取0.2;考虑到植物根系生长需要,生物滞留槽深度 D_B 不宜小于60~120 cm;对于滞留槽中土壤及填料,其平均渗透系数 K 多介于 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-7} m/s$;设计降雨重现期可取2~10a,设计单场降雨历时可取120 min。

将以上参数中径流系数 φ 、表层最大蓄水深度 h 、填料空隙率 θ 、植株横截面百分比 f 、单场降雨历时 T 视为定值,对生物滞留槽深度 D_B 分别取0.6 m、0.8 m、1.0 m、1.2 m,土壤及填料平均渗透系数分别取 $1 \times 10^{-7} m/s$ 、 $5 \times 10^{-7} m/s$ 、 $1 \times 10^{-6} m/s$ 、 $5 \times 10^{-6} m/s$ 、 $1 \times 10^{-5} m/s$,降雨重现期分别取2a、3a、5a、10a,共设计有80种工况,经计算得到相应的汇流比 N ,鉴于篇幅限制,以下仅列出其中的36种典型工况,其计算结果见速算表1~表4(参量选取: $\varphi=0.9$, $h=0.2 m$, $T=120 min$, $\theta=0.05$, $f=0.2$),其中西安及周边地区降雨强度可采用卢金锁等^[14]提出的雨强公式进行计算:

$$i = \frac{16.715(1 + 1.1658 \lg P)}{(T + 16.813)^{0.9302}} \quad (13)$$

在使用时,应先从速算表中查出汇流比 N ,再结合项目汇流区面积即可由式(11)快速计算出生物滞留槽表面积。

从速算表1至表4中数据可以看出,汇流比 N 的典型值多集中在4~11之间,与部分学者如朋四海等^[15]提出的生物滞留设施面积应为汇流区域面积的5%~7%的观点有出入,这主要是地域及降雨

差异导致。该学者提出的设计参数适用于合肥地区,其降雨量远大于西安地区,再结合海绵城市建设指南中年径流总量控制率的要求,一般对于我国东部、南部等年均降雨量大的区域,其要求的控制率小,而年均降雨量小的地区,其要求的控制率大。若在年均降雨量小的地域如西安地区采用较大的汇流比,则生物滞留槽单位面积上应对的径流量就会增大,其径流量削减率势必会下降,即降低了其径流量控制率,这与指南中的精神就会相违背,故在降雨量较小的西安地区不宜采用过大的汇流比。

表 1 $P=2a$ 时汇流比 N 速算表Tab. 1 Confluence ratio N calculation table at $P=2a$

$K/(m \cdot s^{-1})$	D_B/m	N
1×10^{-6}	0.8	7.29
	1.0	7.68
	1.2	8.07
5×10^{-6}	0.8	8.58
	1.0	8.94
	1.2	9.31
1×10^{-5}	0.8	10.19
	1.0	10.52
	1.2	10.87

表 2 $P=3a$ 时汇流比 N 速算表Tab. 2 Confluence ratio N calculation table at $P=3a$

$K/(m \cdot s^{-1})$	D_B/m	N
1×10^{-6}	0.8	6.19
	1.0	6.53
	1.2	6.87
5×10^{-6}	0.8	7.31
	1.0	7.62
	1.2	7.95
1×10^{-5}	0.8	8.71
	1.0	8.99
	1.2	9.30

表 3 $P=5a$ 时汇流比 N 速算表Tab. 3 Confluence ratio N calculation table at $P=5a$

$K/(m \cdot s^{-1})$	D_B/m	N
1×10^{-6}	0.8	5.16
	1.0	5.46
	1.2	5.75
5×10^{-6}	0.8	6.12
	1.0	6.39
	1.2	6.67
1×10^{-5}	0.8	7.32
	1.0	7.57
	1.2	7.83

表 4 $P=10a$ 时汇流比 N 速算表Tab. 4 Confluence ratio N calculation table at $P=10a$

$K/(m \cdot s^{-1})$	D_B/m	N
1×10^{-6}	0.8	4.17
	1.0	4.41
	1.2	4.65
5×10^{-6}	0.8	4.97
	1.0	5.20
	1.2	5.43
1×10^{-5}	0.8	5.98
	1.0	6.18
	1.2	6.40

2.3 生物滞留槽入流口设计

生物滞留槽入水口设计需考虑降雨径流量、道路纵向坡度、横向坡度等因素,入流豁口高度可根据路缘石高度决定,一般可取 $0.1 \sim 0.2$ m;其总长度可参照下式^[16]计算:

$$L = K_0 Q^{0.42} S^{0.3} (nr)^{-0.6} \quad (14)$$

式中: L 为入流豁口总长度(m); K_0 为经验常数; S 为纵向坡度; n 为曼宁系数; r 为路面横向坡度(%)。

对于常规道路, K_0 可取 0.817, S 可取 0.3%, n 可取 0.016,则生物滞留槽入流豁口总长可用下式简化计算:

$$L = 1.71 \frac{Q^{0.42}}{r^{0.6}} \quad (15)$$

求得入流豁口总长后,将豁口按图 3 所示的形式分配到生物滞留槽边石上,图 3(a)单个豁口长度宜在 $15 \sim 30$ cm,图 3(b)单个豁口长度宜在 $30 \sim 50$ cm,每组豁口的间距可取 $20 \sim 50$ m。

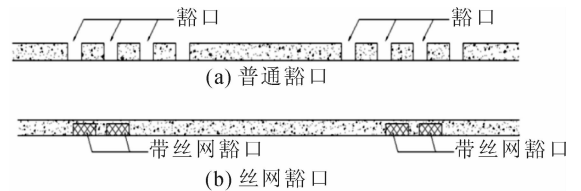


图 3 豁口布置形式

Fig. 3 Layout form of the gap

2.4 生物滞留槽溢流井设计

生物滞留槽溢流井与市政管网相接,溢流口高度低于道路边缘并高于集水层上界面,过量雨水径流通过溢流井进入市政雨水管网后排放,溢流管管径应与相衔接的下游市政管网的设计标准匹配。

溢流井平面布置图见图 4,其剖面图见图 5。

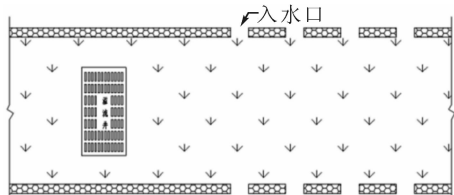


图4 溢流井平面布置图

Fig. 4 Plot plan of the overflow well

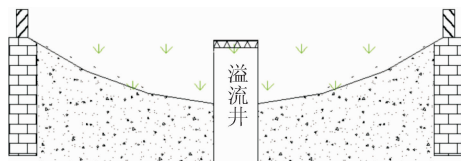


图5 溢流井剖面布置图

Fig. 5 Section of the overflow well

3 案例分析

3.1 工程概况

该生物滞留槽工程位于西咸新区沣西新城海绵城市试点建设区某道路分隔绿化带内,该道路规划年径流总量控制率目标不低于85%,径流中SS负荷削减目标不低于60%。

本生物滞留槽主要设计参数有:设计降雨重现期为3a,单场降雨历时为120 min,设计降雨量由式(13)计算得32.1 mm;其路基侧采用两布一膜做防渗处理,底部可直接入渗;设计表面蓄水层深度为20 cm;设计填料层空隙率为0.05;填料层总深度为100 cm,自上而下分别为60 cm种植土层、20 cm炉渣层、20 cm砾石层。经实测所选区段汇水面积约为573.6 m²,土壤渗透系数接近1×10⁻⁶ m/s。

查表2知其设计汇流比N=6.53,经计算知生物滞留槽设计面积应为76.2 m²;根据场地实际情况,设计该生物滞留槽有效宽为2.7 m,长度为28.0 m,实际面积为75.6 m²,实际汇流比N=6.58。

3.2 降雨监测结果分析

生物滞留槽径流水量削减率和污染负荷削减率可分别由公式(16)、(17)计算得出:

$$R_V = \frac{V_{入} - V_{出}}{V_{入}} \times 100\% \quad (16)$$

$$R_Q = \frac{C_{入} V_{入} - C_{出} V_{出}}{C_{入} V_{入}} \times 100\% \quad (17)$$

式中: R_V 、 R_Q 分别为径流量削减率和污染负荷削减率; $V_{入}$ 、 $V_{出}$ 分别为入流及出流总水量(m³); $C_{入}$ 、 $C_{出}$ 分别为入流及出流污染物平均浓度(EMC值)(mg/L)。

自2015年5月中旬至2016年6月初,共监测

降雨7场次,其降雨量介于2.5~30.4 mm,各场次降雨历时及径流量削减率数据见表5。在所监测的7场降雨中仅有3场次有外排现象,对于无外排水降雨事件则视生物滞留槽水量削减率为100%、污染负荷削减率亦为100%。

表5 各场降雨径流削减效果

Tab. 5 Runoff reduction effect of each field

编号	日期	降雨 历时/min	降雨 量/mm	径流量 削减率/%
1	2015-05-10	130	2.5	100.0
2	2015-08-02	100	30.4	83.0
3	2015-08-06	85	12.9	98.2
4	2015-09-03	270	13.2	100.0
5	2015-09-08	110	14.7	96.9
6	2016-05-22	330	5.6	100.0
7	2016-06-01	300	5.8	100.0

由表5监测结果可知,该生物滞留槽对于单次短历时降雨量在30 mm以下的降雨,其径流量削减率可达80%以上,对低于设计工况的降雨其径流量削减率可达100%;对于2015-08-06及2015-09-08两场降雨,其降雨量小于设计降雨级别但有少量出流现象,初步分析其原因可能有两方面原因,一是在这两场降雨前3~4日均有降雨,土壤湿度较大,影响径流雨水储存和下渗,二是这两场降雨历时均小于设计值。

以2015-08-02短历时强降雨监测数据为例,本次降雨量、径流量等数据记录如表6所示,径流中主要污染物进出水浓度EMC值及径流污染负荷削减率数据如表7所示。

表6 降雨量及径流量数据表

Tab. 6 Rainfall and runoff data

降雨日期	降雨 量/mm	入流 量/m ³	外排 量/m ³	水量 削减率/%
2015-08-02	30.4	15.68	2.67	83.0

表7 主要污染物数据表

Tab. 7 Major pollutants data

监测指标	总氮	氨氮	总磷	COD _{Cr}	SS
入流均值/(mg·L ⁻¹)	3.13	0.58	0.13	79.1	185
出流均值/(mg·L ⁻¹)	3.64	0.22	0.08	70.6	83
负荷削减率/%	80.2	93.5	89.7	84.8	92.3

由表7可以看出,对短历时强降雨,径流中SS、氨氮污染负荷削减率可达90%以上,总氮、总磷、COD污染负荷削减率可达80%以上;分析其原因

在于,一是该道路属新建道路,车流量较小,周边无工业及生活区分布,路面较为干净,故雨水径流中主要污染物浓度相较西安市主城区道路径流污染物浓度^[17-18]明显偏低;二是生物滞留槽对道路径流量削减幅度较大,从式(17)可以看出其污染负荷削减率就越大。

总之,采用汇流比速算法进行生物滞留设施设计,工程人员可根据降雨重现期、土壤渗透系数等参数从速算表中查出滞留槽设计深度及适宜汇流比,从而快速确定生物滞留设施的面积,避免复杂的理论计算,其方法较为简便;再者,从径流量削减和污染物负荷削减两方面的实地监测数据可以反映出,依照该方法设计的生物滞留设施,其对道路径流综合调控效果良好,可满足当地海绵城市建设相关目标要求,方法可靠度较高。

4 结论与建议

1) 考虑了降雨量、降雨历时、下垫面类型、装置蓄水层深度、渗透性能、填料空隙储水性能、植被种植密度等因素,所提出的汇流比速算法进行生物滞留槽设计,方法简单,便于工程技术人员掌握运用,同时也能保证生物滞留槽在实践工程中的运行效果;

2) 据此速算法设计的生物滞留槽于2015-05至2016-06共有效监测降雨7场次,降雨量介于2.5~30.4 mm,仅有3场次降雨有出流现象,且均未出现溢流;该装置对降雨径流量削减及主要污染物负荷削减效果均较为显著,单场降雨径流量削减率可达80%以上,主要污染物负荷削减率多在85%以上,对中小降雨径流控制效果较好,充分体现出低影响技术对道路径流综合调控效果;

3) 据此方法设计的生物滞留槽对极端暴雨或较大汇流比情况下的径流调控效果尚待日后进一步监测研究;

4) 生物滞留技术在国内应用时间尚较短,后期还需注重对设施长期运行效果监测,研究填料渗透性能、吸附性能随时间增长的变化规律,研究填料、微生物、植物综合作用结果对径流污染物净化效果,以利于更好地评价污染物在生物滞留系统中的迁移转化规律。

参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
[2] DAVIS A P, SHOKOUHIAN M, SHARMA H, et al. Water quality improvement through bioretention; lead,

copper, and zinc removal [J]. *Water Environment Research*, 2003, 75(1): 73-82.

- [3] HUNT W F, SMITH J T, JADLOCKI S J, et al. Pollutant removal and peak flow mitigation by a bioretention cell in Urban Charlotte, N. C [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2008, 134(5): 403-408.
[4] DIETZA M E, CLAUSEN J C. Stormwater runoff and export changes with development in a traditional and low impact subdivision [J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, 87(4): 560-566.
[5] HATT B E, FLETCHER T D, DELETIC A. Hydrologic and pollutant removal performance of stormwater biofiltration systems at the field scale [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 365(3/4): 310-321.
[6] 李家科, 刘增超, 黄宁俊, 等. 低影响开发(LID)生物滞留技术研究进展 [J]. *干旱区研究*, 2014, 31(3): 431-439.
LI Jiake, LIU Zengchao, HUANG Ningjun, et al. Advance in the study on bioretention technology for low impact development [J]. *Arid Zone Research*, 2014, 31(3): 431-439.
[7] 向璐璐, 李俊奇, 邝诺, 等. 雨水花园设计方法探析 [J]. *给水排水*, 2008, 6: 47-49.
XIANG Lulu, LI Junqi, KUANG Nuo, et al. Discussion on the design methods of rainwater garden [J]. *Water and Wastewater Engineering*, 2008, 6: 47-49.
[8] 潘国艳, 夏军, 张翔, 等. 生物滞留池水文效应的模拟试验研究 [J]. *水电能源科学*, 2012, 30(5): 13-15.
PAN Guoyan, XIA Jun, ZHANG Xiang, et al. Research on simulation test of hydrological effect of bioretention units [J]. *Water Resources and Power*, 2012, 30(5): 13-15.
[9] 孟莹莹, 陈建刚, 张书函. 生物滞留技术研究现状及应用的重要问题探讨 [J]. *中国给水排水*, 2010, 26(24): 21-24.
MENG Yingying, CHEN Jiangan, ZHANG Shuhan. Research status of bioretention technology and discussion on key problems in its domestic application [J]. *China Water and Wastewater*, 2010, 26(24): 21-24.
[10] 邓娜, 李怀恩, 史冬庆, 等. 植被过滤带非点源污染及其对净化效果的影响 [J]. *西安理工大学学报*, 2011, 27(4): 400-406.
DENG Na, LI Huaen, SHI Dongqing, et al. Nonpoint source pollution of vegetative filter strip and its effect upon purification efficiency [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2011, 27(4): 400-406.
[11] 张永峰, 罗纨, 贾中华, 等. 西安地区地下渗滤系统处理生活污水的试验研究 [J]. *西安理工大学学报*, 2007, 23(2): 186-190.

- ZHANG Yongfeng, LUO Wan, JIA Zhonghua, et al. Research on subsurface wastewater infiltration system for domestic sewage treatment in Xi'an area [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2007, 23(2): 186-190.
- [12] 王文亮. 雨水生物滞留技术实验与应用研究 [D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2011.
- WANG Wenliang. The experimental and application research about rainwater bioretention technology [D]. Beijing: Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 2011.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑与小区雨水利用工程技术规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [14] 卢金锁, 程云, 郑琴, 等. 西安市暴雨强度公式的推求研究 [J]. 中国给水排水, 2010, 26(17): 83-84.
- LU Jinsuo, CHENG Yun, ZHENG Qin, et al. Derivation of rainstorm intensity formula in Xian City [J]. China Water and Wastewater, 2010, 26(17): 83-84.
- [15] 朋四海, 李田, 黄俊杰. 合肥地区生物滞留设施的合理构型与设计参数 [J]. 中国给水排水, 2014, 30(17): 145-149.
- PENG Sihai, LI Tian, HUANG Junjie. Reasonable configuration and design parameters of bioretention facilities in Hefei [J]. China Water and Wastewater, 2014, 30(17): 145-149.
- [16] 李树平, 刘遂庆. 城市排水管渠系统 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [17] 袁宏林, 陈海清, 林原. 西安市降雨水质变化规律分析 [J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2011, 43(3): 23-34.
- YUAN Honglin, CHEN Haiqing, LIN Yuan. Analysis of quality variation of rainwater in Xi'an [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2011, 43(3): 23-34.
- [18] 李家科, 杜光斐, 李怀恩, 等. 生态滤沟对城市路面径流的净化效果 [J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 1-6.
- LI Jiake, DU Guangfei, LI Huaien, et al. Purification effects of biological filter on urban road runoff [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(4): 1-6.

(责任编辑 杨小丽)