李芃抒,王文海,李俊奇,等. 道路生物滞留带径流削减效果的试验研究[J]. 水利水电技术,2018,49(12): 1-10. LI Pengshu, WANG Wenhai, LI Junqi, et al. Experimental study on runoff reduction effect of road bio-retention zone [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018,49(12): 1-10.

道路生物滞留带径流削减 效果的试验研究

李芃抒,王文海,李俊奇,王建龙,杨擎柱,涂楠楠

(北京建筑大学城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室,北京 100044)

摘 要: 道路积水是当前我国城市发展面临的突出问题,而设置生物滞留带是典型的道路雨水减排措施之一。为研究不同降雨强度和溢流高度条件下道路生物滞留带的径流削减效果和渗流规律,利用人工降雨装置和模拟道路-生物滞留带平台设计试验,并根据试验结论,结合实际案例进行水文效应计算,对道路生物滞留带设计提出优化建议。结果表明: 试验条件下重现期 P≤10 年时,滞留带可延迟6~10 min 的径流峰值时间;不同试验条件的径流削减率和峰值削减率分别为 41%~100% 和 38%~100%;提升溢流高度对径流总量削减效果明显,并对渗流过程有较大影响; 渗流流量与滞留带表面水头高度存在一定函数关系。基于试验结果,对道路-生物滞留带系统径流削减率公式进行了推导,为部分参数选取提供了参考值。

关键词: 生物滞留带; 径流削减; 溢流高度; 渗流过程; 海绵城市建设; 城市水文学; 城市雨洪资源 利用; 低影响开发技术

doi: 10. 13928/j. cnki. wrahe. 2018. 12. 001

中图分类号: TU99 文献标识码: A 文章编号: 1000-0860(2018) 12-0001-10

Experimental study on runoff reduction effect of road bio-retention zone

LI Pengshu , WANG Wenhai , LI Junqi , WANG Jianlong , YANG Qingzhu , TU Nannan

(Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment (Beijing University of Civil Engineering and Architecture), Ministry of Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044)

Abstract: Road water-logging is a prominent problem during the urban development in China, while the arrangement of bio-retention zone is one of the typical road rainwater reduction measures as well. In order to study the runoff reduction effect and seepage law of road bio-retention zone under the conditions of various rainfall intensities and overflow heights, the experiment is designed with artificial rainfall device and simulated road bio-retention platform, and then the hydrologic effect is calculated in combination with the actual case concerned for proposing the relevant optimization suggestions on the design of the road bio-retention zone in accordance with the experimental conclusion. The result shows that under the experimental condition, when the return period is $P \leq 10a$, the time of the peak runoff can be delayed by 6 ~ 10 min with the bio-retention zone. The runoff reduction rate and the rate of the peak value are 41% ~ 100% and 38% ~ 100% respectively under different experiment conditions, while increasing the overflow height has an obvious effect on the reduction of the total runoff and a larger influence on the seepage

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478026); 北京未来城市设计高精尖创新中心项目(UDC2016040100)

作者简介: 李芃抒(1990—),男,硕士研究生,从事雨水污染控制与资源化利用研究。E-mail: cat11235813@163.com

通信作者: 王文海(1963—),男,教授,硕士,从事水力学、雨水污染控制与资源化利用研究。E-mail: wangwenhai@bucea.edu.cn

收稿日期: 2018-11-20

Water Resources and Hydropower Engineering Vol. 49 No. 12

process. A certain functional relation is there between the seepage flowrate and the height of the surface water head of the bio-retention zone. Based on the experimental result, runoff reduction rate formula of road bio-retention zone system is deduced, thus provides the relevant reference values for the selection of part of the parameters concerned.

Keywords: bio-retention zone; runoff reduction; overflow height; seepage process; sponge city construction; urban hydrology; utilization of urban rainfall and flood resources; low impact development technology

0 引 言

随着城市化过程加快,下垫面条件发生改变,不 透水面积增加,导致降水水文循环发生变化,引起了 径流污染加剧、地表径流增加、径流峰值流量增大等 一系列问题^[1]。作为应用最为广泛的低影响开发技 术之一,生物滞留设施在消除径流污染、削减径流流 量等方面起着重要作用^[2]。

对于生物滞留带的削峰及径流削减效果,目前已 开展了大量研究。HUNT等^[3]的研究表明,降雨量小 于42 mm 时,滞留带的峰值削减率可达96.5%。通 过改变生物滞留带结构层的水量平衡,径流总量削减 率可达50%^[4]。DAVIS^[5]对马里兰大学内两个生物 滞留设施进行了为期两年的监测,发现生物滞留池可 控制全年18%~49%的降雨场次,峰值削减量可达 40%~48%,并可延迟近两倍的峰值时间。LI等 人^[6]的研究发现,滞留带主要通过下渗和蒸发作用 削减径流量。对于生物滞留设施与道路联用时的水文 控制效果研究则偏重于现场观测,许萍等^[7]对深圳 光明新区透水路面-生物滞留带进行了研究,认为该 系统在小雨条件下可实现雨水不外排,中、大雨事件 下也有较好的控制效果。但目前尚缺乏针对联用系统 的定量试验研究。

城市道路附属绿化设施以普通绿化隔离带为主^[8], 在结构参数、渗透性能等方面与生物滞留带有着较大 差别。生物滞留带的收水来源包括部分路面径流及降 雨,入流情况复杂,国内外对其的研究偏重于理论分 析,对水文方面的研究则多限于实验室小范围,无法 模拟真实入流情况,与现实道路情况有一定差距^[9-11]。 鉴于降雨特征的随机性,实际水文水质监测和数据分 析又存有一定困难。本文通过人工降雨试验模拟真实 情景,针对不同降雨强度及滞留带溢流高度设计试 验,对生物滞留带径流削减控制效果进行研究,分析 产流机理,以期为生物滞留带设计提供技术支持。

1 生物滞留带渗流过程分析

通常情况下,生物滞留带设有一定的溢流高度。 降雨开始后,表层土壤即开始吸水一吸水饱和一渗透 的过程。当入流速率超过渗流速率时,滞留带表面即 形成积水。当水深超过溢流高度时,地表径流通过溢 流设施排至雨水管网,未排走的雨水仍通过滞留带不 同结构层渗透,最终汇至穿孔管出流。

生物滞留带渗流过程满足达西定律^[12],即渗流 流速 v 和水力梯度成正比

$$v = K_s \, \frac{\Delta H}{L} \tag{1}$$

式中,L 为渗流路径的直线长度; ΔH 为渗流路径始末 断面的总水头差; $\Delta H/L$ 即为相对应的水力梯度; K_s 为孔隙介质的饱和渗透系数,其单位与速度单位相同。

对于非饱和土壤,达西定律可表示为[12]

$$v = -K_{\theta} \nabla \varphi \tag{2}$$

式中, K_{θ} 为渗透系数; $\nabla \varphi$ 为水势梯度。

土壤处于非饱和状态时,由于土壤中部分孔隙为 气体所充填,故此时渗透系数低于饱和渗透系数,且 K_{θ} 是关于土壤含水率的函数,随土壤含水率的增大 而升高;而水势梯度 $\nabla \varphi$ 则应同时考虑重力势和基质 势,即相对高度差和土壤的干湿程度。而生物滞留带 的渗流过程实际上是非饱和一饱和的变化过程。穿孔 管产流时,土壤往往已达到饱和状态,故研究饱和状 态的渗流过程更有意义。吸水饱和时, K_{θ} 即等于 K_{s} , 而 $\nabla \varphi$ 则仅与重力势有关。

对于生物滞留带而言,其结构一般包括存水区、 渗透区、排水区(如碎石层)等几部分,其中存水区 上表面、渗透区下表面均可视作直接暴露在大气中, 以 B – B 水平面作为基准参考势面,如图1所示。故 达西定律可表示为

$$v = -K_{s} \frac{\varphi_{B} - \varphi_{0}}{H_{B} - H_{0}} = -K_{s} \frac{-L - H}{L - 0}$$
(3)

式中, φ_B 为B-B水平面的总水势(m); H_B 为B-B 水平面的垂直高度(m)。

则该公式则可转化为

$$K_s = \frac{L}{L+H} \times v \tag{4}$$

即在滞留带土壤饱和条件下,渗透速率 v 与土壤 上方存蓄水位高度 H 及渗流长度(渗流土壤层厚度) L 有关,并可据此求出饱和渗透系数 K,值。

水利水电技术 第49卷 2018年第12期



2 试验设计

试验装置由人工降雨系统、生物滞留带及流量监 测系统组成,如图2、图3所示: 生物渗流带试验装 置长10m,宽1m,高0.7m,由上至下依次为溢流 口、蓄水层、种植土壤层、透水土工布、碎石层、穿 孔管和防渗膜,各部分构造及深度如图4所示。其中 种植土壤层材质为普通种植土,碎石粒径10~15 mm。道路面层采用透水沥青铺装,长18m,宽4m, 按《道路排水性沥青路面技术规程》^[13]进行设计施工。 滞留带中部设有进水口,以接收路面汇流进水。选用 耐淹性较好的白鹤芋和堇花槐作为滞留带种植植物。 每次降雨间隔设置为8~10h。滞留带入流及溢流流 量均使用超声波流量计测量,穿孔管流量采用体积法 测量。



图2 人工降雨装置

试验采用的暴雨强度公式为

$$q = \frac{1.132(1+0.958 \lg P)}{(t+5.408)^{0.595}}$$
(5)

- 式中,暴雨强度 q 单位(L/s Ha); P 为降雨重现期 (年); t 为设计降雨历时(min)。
- 根据暴雨强度公式,计算得出人工模拟降雨参数,如表1所列。

为研究不同重现期及不同蓄水高度对滞留带滞蓄



图3 生物滞留带实景



图 4 生物滞留带结构示意(单位: mm)

表1 试验降雨强度统计

时间/min	P=1年	<i>P</i> =3年	<i>P</i> =5年	<i>P</i> =10年	P=20年
0	16. 78	24. 45	28.02	32.86	37.70
5	20.07	29.25	33. 52	39.63	45.10
10	25.81	37.62	43.10	50. 55	57.99
15	39.16	57.05	65.37	76.67	87.96
20	96.96	141.28	161.88	189.85	217.81
25	64. 88	94. 53	108.32	127.03	145. 74
30	38. 52	56.12	64.31	75.42	86.41
35	28.67	41.77	47.86	56.13	64.39
40	23.38	34.06	39.03	45.78	52. 52
45	19.83	28.35	33.44	39. 21	44. 99
50	17.69	25.77	29. 53	34.63	39.73
55	15.95	23. 24	26.63	31.23	35. 82
	1	1		1	1

效应的影响,设计 11 组试验,具体试验设置参数如 表 2 所列。

试验时,根据降雨强度表,使用人工降雨装置, 完成不同重现期的1h降雨过程,通过雨量计数据及 流量计数据,绘制不同试验工况的降雨曲线、生物滞

mm/h



图 5 降雨过程曲线示意

试验 编号	降雨重 现期/年	溢流高度 /cm	试验 编号	降雨重 现期/年	溢流高度 /cm
1	1	5	7	5	10
2	3	5	8	10	10
3	5	5	9	3	15
4	10	5	10	5	15
5	20	5	11	10	15
6	3	10			

表2 试验分组设计

留带入流及溢流过程曲线; 每隔1~5 min 记录一次 穿孔管出流流量,记录数据采用内插法处理得到渗流 过程曲线,并比较分析试验结果。

3 试验结果分析

3.1 生物滞留带调蓄效果分析

评价生物滞留设施雨水调蓄能力时,可使用径流 总量削减率、径流峰值削减率、峰值延迟时间等指标 进行分析,其计算公式分别为

(7)

$R_v = \frac{V_{\rm in}}{V}$	$\frac{-V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \times 100\%$	(6)
$R_{\text{peak}} = \frac{Q_1}{Q_2}$	$\frac{1}{Q_{\text{peak}-\text{in}}} - Q_{\text{peak}-\text{o}}$	×

100%

 $T_{delay} = T_{peak-out} - T_{peak-in}$ (8) 式中, R_v 为总量削减率; V_{in} 和 V_{out} 分别为入流总体积和 溢流总体积; R_{peak} 为峰值削 减率; $Q_{peak-in}$ 和 $Q_{peak-out}$ 分别 为入流及溢流峰值流量; T_{delay} 为峰值延迟时间; $T_{peak-in}$ 和 $T_{peak-out}$ 分别为入流及溢流峰值

4

试验 编号	入流峰值 时间/min	溢流峰值 时间/min	峰值延迟 时间/min	入流峰值 /m ³ ・h ⁻¹	溢流峰值 /m ³ ・h ⁻¹	入流总 体积/m ³	溢流总 体积/m ³			
1	23	31	8	3.81	0.21	0.67	0.09			
2	23	30	7	5.18	1.57	1.11	0. 53			
3	22	29	7	5.66	2.40	1.38	0.76			
4	23	29	6	6.72	3.01	1.73	0.93			
5	26	26	0	7.88	4. 92	2.00	1.17			
6	25	32	7	4.89	1.34	1.11	0.33			
7	27	34	7	5.42	2.33	1.48	0.69			
8	25	32	7	6.52	2.95	1.84	0.90			
9	23	_	_	5.04	_	1.16	—			
10	23	_	—	5.51	_	1.35	_			
11	25	35	10	6.88	3.58	1.86	0.66			

注: 试验编号9,10 未出现溢流

时刻。

根据试验采集的流量过程曲 线,统计滞留带入流/溢流峰值 时间、入流/溢流峰值等,并对 流量曲线进行积分计算,得到滞 留带入流/溢流总体积,应用公 式分别计算不同试验工况的峰值 延迟时间、峰值削减率及总量削 减率,结果如表3所列及图6、 图7所示。

据表 3 及图 6、图 7 分析可 得,峰值延迟时间随着降雨强度 增加而缩短,除试验编号 5 工况 (*P* = 20 年)外,其余试验均具有

6~10 min 的峰值延迟时间,考虑到表层土壤达到吸 水饱和,对峰前降雨及前期道路入流接纳能力有限, 峰值延迟时间较短,溢流高度为10 cm时,峰值延迟 时间几乎不受影响; 溢流高度为 15 cm, 降雨重现期 P=3年和5年时,滞留带均未发生溢流,而P=10年时,峰值延迟时间则有明显延长。滞留带对溢流峰 值流量影响比较明显,溢流高度为5 cm和10 cm时, 峰值流量平均削减值为 3.43 m³/h 和 3.40 m³/h,两 者较为接近,峰值流量削减率为100%~38%,且随 着降雨重现期增加而依次减小,该试验结果与黄静岩 等[14] 实地观测的 100% ~ 53.4% 的峰值削减率较为 接近;对比不同溢流高度的峰值削减率,溢流高度由 5 cm 增加至 10 cm 时,降雨重现期 P=3 年工况下峰 值削减率略有提升,而P≥5年时,削减率则基本无 变化。径流总量削减方面,溢流高度为5 cm、10 cm 和 15 cm 时, 平均径流总量削减值分别为 0.68 m³、 0.84 m³ 和 1.24 m³, 重现期由小至大变化时, 径流

表 3	生物滞留带调蓄效果比较

水利水电技术 第49卷 2018年第12期

雨量 径流系数

0.13

0.48

0.55

0.54 0.59

0.30

0.47

0.49

0

0

0.35



100%

100%

总量削减率为 86% ~ 41%,当 溢流高度由 5 cm 增至 10 cm 时, P = 3年的径流总量控制率提升 了 18%, P = 5年和 P = 10年的 总量控制率则分别提升了 8%和 5%;溢流高度由 10 cm 增至 15 cm 时, P = 3年和 P = 5年的径 流完全被滞留带所消纳, P = 10年的削减率则提升了 13%。滞 留带土壤饱和条件下,相比较峰 值延迟时间与峰值削减率,滞留 带溢流高度变化对削减径流总量 影响更为显著,且增加滞留带内 水位高度有利于设施对径流的削 减效果。

3.2 生物滞留带渗流分析

根据滞留带底部穿孔管出流 流量,绘制不同试验工况的渗流 流量-时间曲线,如图8—图11 所示,并根据降雨重现期及溢流 高度分别进行分析。

由图 8—图 11 可知, 渗流 流量变化存在明显的三个区间, 即上升期、平稳期和下降期,不 同试验工况的上升期与下降期的 变化趋势基本相同,而平稳期的 持续时间则随着溢流高度的增加 而增加,分别统计不同工况的滞 留带溢流持续时间、渗流平稳期 持续时间与渗流总历时,计算渗 流平稳期流量的平均值并进行分 析,结果如表4所列。

分析表4可得,溢流高度为 5 cm 时(试验编号1—5),渗流 平稳期持续时间基本等于溢流时 间,即此时渗流主要受滞留带上 方存水水位高度的影响,而当溢 流高度提升至10 cm 和15 cm 时,溢流时间均有所缩短,而渗 流总历时均有增加;且除P=3 年工况外,渗流平稳期持续时间 均大于溢流时间。分析原因,虽 然此时滞留带内水位达到溢流高 度时间较短或不发生溢流现象,

水利水电技术 第49卷 2018年第12期

图 8

50

100

0

100

200

250

300

150

时间/min

不同重现期下渗流 - 时间散点图(溢流高度: 5 cm)









但存水区内的水头高度仍能保持相对稳定。由于溢 结果如表6所列。

6

流量减少,渗流总量及总历时 均增加,渗流平稳期的持续时 间也更长。

分析不同工况的渗流平稳期 流量均值,溢流高度为5 cm 时, 除 P = 20年工况外,其余试验组 的流量均值均较为接近,平均值 约为 0.24 m³/h,而溢流高度为 10 cm 和 15 cm 时,平均值则分 别为 0.28 m³/h 和 0.33 m³/h。 同一溢流高度(试验 1—4、6— 8、9—11)的流量均值基本相等, 说明在生物滞留带结构不变的情 况下,该数值仅受溢流高度影 响。存水水头高度越高,平稳期 流量均值越大。

本试验中,种植土壤层面积 为10 m²,种植土层厚度为0.2 m, 溢流高度分别为0.05 m、0.10 m 和0.15 m。在已知渗流流量的 条件下,根据以上数据,使用式 (4)对试验结论进行验证,得到 不同试验组别的饱和渗透系数 *K*,,结果如表5 所列。

可见,除试验编号 5(P = 20 年,溢流高度 5 cm)外,其余试 验计算得出的饱和渗透系数均基 本相同,均值为 0.31 mm/min。 该数值符合《工程地质手册第四 版》^[15]中提供的壤土饱和渗透系 数范围。

根据计算得出的渗透系数 值,得出本试验渗流速率 v 与存 水区水头高度 ΔH 的相关公式, 近似满足一次函数关系

v = 0.31 × (1 + 5ΔH) (9) 式中,v为渗透速率(mm/min); ΔH为存水区水头(m)。

由渗流流量 Q-t 曲线可知, 渗流流量上升期与下降期的变化 曲线同样近似满足一次函数关 系,现分别对不同工况的上升 期、下降期曲线进行拟合分析,

平稳期流量均值 试验 溢流持续 渗流平稳期 渗流总历时 试验 溢流持续 渗流平稳期 渗流总历时 平稳期流量均值 编号 时间/min 持续时间/min $/m^{3} \cdot h^{-1}$ 编号 时间/min 持续时间/min $/m^{3} \cdot h^{-1}$ /min /min 7 1 56 62 254 0.21 39 62 287 0.28 0.29 2 65 61 226 0.24 8 41 77 308 3 44 40 212 0.24 9 37 331 0.33 4 10 0.32 62 58 220 0.25 87 358 5 35 32 268 0.32 11 33 99 392 0.33 0.28 6 33 33 256

表4 生物滞留带渗流分析

表5 生物滞留带渗透系数统计 mm/min

试验 编号	渗透系数 <i>K_s</i>	试验 编号	渗透系数 <i>K_s</i>	试验 编号	渗透系数 <i>K_s</i>
1	0. 28	5	0. 43	9	0. 31
2	0.32	6	0.31	10	0.30
3	0.32	7	0.31	11	0.31
4	0.33	8	0.32		

由表 6 分析可得,不同溢流高度、不同降雨重 现期的上升期及下降期的拟合曲线基本相同,即在 滞留带吸水饱和的条件下,上升期与下降期的曲线 变化同样仅与存水区水头变化有关,则滞留带上 方存水区水头变化 Δ*H* 可表示为时间 *t* 的一次函 数,本试验中,上升区及下降区的 Δ*H* – *t* 函数关 系分别如下所述。

渗流速率上升区间

$$\Delta H = 2.83 \times 10^{-6} t - 0.2 \tag{10}$$

渗流速率下降区间

$$\Delta H = 3.73 \times 10^{-7} t - 0.2 \tag{11}$$

式中, t 为时间(min); ΔH 为存水区水头高度(m)。

根据公式计算可得,溢流高度为5 cm、10 cm 和 15 cm 时,滞留带出现溢流所需要的时间分别为 24.3 min、29.3 min 和 34.2 min,与试验观测的溢流出现

试验编号	上升期公式	R^2	下降期公式	R^2
1	$Q = 1.24 \times 10^{-4} t - 0.021$	$R^2 = 0.972$	$Q = -2.01 \times 10^{-5} t + 0.200$	$R^2 = 0.990$
2	$Q = 1.53 \times 10^{-4} t + 0.051$	$R^2 = 0.973$	$Q = -2.04 \times 10^{-5} t + 0.239$	$R^2 = 0.991$
3	$Q = 1.63 \times 10^{-4} t + 0.015$	$R^2 = 0.952$	$Q = -2.06 \times 10^{-5} t + 0.236$	$R^2 = 0.991$
4	$Q = 1.57 \times 10^{-4} t + 0.319$	$R^2 = 0.954$	$Q = -2.01 \times 10^{-5} t + 0.249$	$R^2 = 0.991$
5	$Q = 1.45 \times 10^{-4} t - 0.066$	$R^2 = 0.914$	$Q = -2.09 \times 10^{-5} t + 0.319$	$R^2 = 0.993$
6	$Q = 1.58 \times 10^{-4} t + 0.033$	$R^2 = 0.941$	$Q = -2.04 \times 10^{-5} t + 0.288$	$R^2 = 0.994$
7	$Q = 1.67 \times 10^{-4} t + 0.016$	$R^2 = 0.875$	$Q = -2.06 \times 10^{-5} t + 0.303$	$R^2 = 0.994$
8	$Q = 1.62 \times 10^{-4} t - 0.028$	$R^2 = 0.861$	$Q = -2.09 \times 10^{-5} t + 0.286$	$R^2 = 0.993$
9	$Q = 1.57 \times 10^{-4} t + 0.035$	$R^2 = 0.892$	$Q = -2.39 \times 10^{-5} t + 0.314$	$R^2 = 0.984$
10	$Q = 1.49 \times 10^{-4} t + 0.018$	$R^2 = 0.948$	$Q = -2.09 \times 10^{-5} t + 0.332$	$R^2 = 0.995$
11	$Q = 1.57 \times 10^{-4} t + 0.118$	$R^2 = 0.888$	$Q = -2.\ 10 \times 10^{-5} t + 0.\ 319$	$R^2 = 0.995$

表6 渗流上升期/下降期流量-时间公式拟合

注: 渗流流量 Q 单位为 m³ • h⁻¹; 时间单位为 s

水利水电技术 第49卷 2018年第12期

时间基本一致。需要注意的是,滞留带中存水区水量 随时间的变化值是入流流量与渗流流量的差值,且在 本试验中,入流流速远大于渗流流速,故水头变化 $\Delta H - t$ 曲线实际是入流流量 Q - t曲线的反映,与降 雨强度密切相关。由于试验条件需要,本试验中降雨 强度变化趋势基本相同,故渗流上升期曲线斜率也基 本相同。实际情况降雨条件与试验降雨有所区别,上 升期曲线变化则也需做出对应调整;而下降期区间起 点一般位于降雨结束之后,即此时滞留带不再有客水 入流,反映的是滞留带存水饱和直至表层积水排空的 流量变化,溢流高度为5 cm、10 cm 和 15 cm 时,排 空时间分别约为 3.1 h、3.7 h 和 4.3 h,即溢流高度 越高,所需排空时间越长。

为使生物滞留带渗透性能达到最优,径流削减能 力达到最大化,根据渗流流量 – 时间图像,应尽量延 长渗流平稳期时间,提升渗流平稳期流量值。通过分 析可知,在滞留带结构层确定时,设置溢流高度(存 水区高度)是解决滞留带雨水径流总量削减问题的关 键。溢流高度越高,滞留带上方存水空间越大,渗流 最大值及平稳期时间均有增加;然而滞留带排空时间 也相应延长,且存水区高度过高对滞留带植物生长有 较大影响,故应因地制宜,根据当地条件,合理设计

选择滞留带溢流高度。

相对应的,滞留带削峰能力 (包括峰值流量削减、峰值时间延 迟)则主要受制约于滞留带土壤的 持水程度,即降雨过程开始之前土 壤的含水量;土壤越干燥、滞留带 表面水头达到溢流高度时间越长, 峰值削减效果越为明显。而土壤持 水程度除与土壤性质有关以外,还 和降雨间隔、植物吸收、蒸发下渗 等一系列因素相关联。削峰能力与 土壤含水量的相关影响有待进一步 的试验研究。 4 试验结果应用于道路海绵化改造的效果分析

4.1 基于试验结果的径流削减公式推导

基于试验结果,对道路-生物滞留带系统径流削 减效果公式进行推导,过程如下。

对于某一地区,根据暴雨强度公式,可求得某一 时刻 t 瞬时降雨强度 i,该强度与降雨重现期 P 及时 间 t 有关,记为 i(P,t),则道路面积 A 的总降雨流 量 Q_R 为

$$Q_R = A \times i(P, t) \tag{12}$$

式中, *P* 为降雨重现期(年); *t* 为降雨时刻(0 < *t* ≤ *T*, *T* 为总降雨历时)。

考虑滞留带收水来源包含降雨及道路转输。设道路面积 A 对应的滞留带面积为 nA,且道路径流并非全部流入滞留带,存在某一折减系数 m,则滞留带入流流量 Q_B 为

$$Q_{B} = (m+n) \times A \times i(P, t)$$
(13)

式中, n 为滞留带与道路的面积比;折减系数 m 与多 种因素相关联,包括道路横纵坡、路面材质、降雨重 现期、豁口布置形式等,且随降雨时间变化而变化。 根据试验结果,提出不同重现期的 m 值参考值,如 表7所列。

表7 折减系数 *m* 参考值

降雨重现期/年	折减系数 m
1	0. 12
3	0. 16
5	0. 19
10	0. 22
20	0. 22

根据式(4) 可得,下渗速率与表面水头高度 H、 渗透系数 K,及渗透层厚度 L 有关,则滞留带渗流流 量 Q、为

$$Q_s = n \times A \times K_s \times \frac{L+H}{L}$$
(14)

故滞留带内水位可表示为入流与渗流流量差值对 时间的积分与面积的比值,即

$$H = \frac{\int_{0}^{t} \left[(m+n) Ai(P,t) - nAK_s \frac{L+H}{L} \right] dt}{nA}$$
(15)

化简后得

$$H = \frac{L\left[(m+n) \int_{0}^{t} i(P,t) \, dt - nK_{s}t\right]}{n(L+K_{s}t)}$$
(16)

由式(16)可知,滞留带内水位高度与诸多因素 相关,而在试验条件确定情况下,水位高度则仅与时 间 t 有关,可绘制 H-t 曲线,如图 12 所示。



图 12 滞留带水位 - 时间曲线示意

式中, t_1 为开始积水时间,主要与土壤初始含水率有 关; t_4 为积水消失时间,主要与土壤渗透系数有关。 根据给定的溢流高度 H_a ,由H - t曲线可知,存有时 刻 $t_2 \times t_3$,则滞留带的溢流体积V可表示为H对时间 t的积分与存蓄水量的差值,即

$$V = A \left[\int_{t_2}^{t_3} H dt - H_o(t_3 - t_2) \right]$$
(17)

道路 – 生物滞留带系统的径流总量控制率计算公 式为

$$\eta = \frac{A(m+n) \int_{0}^{t} i(P,t) dt - V}{A(1+n) \int_{0}^{t} i(P,t) dt}$$
(18)

4.2 道路简介

为满足海绵城市建设需要,对某城市主干道进行 低影响开发改造。道路横断面如图 13 所示,其中车 道总宽度(包含机动车道与非机动车道)为 35 m,绿 化带总宽度(不含中央分隔带及树池)为9 m,服务面 积比约为 3.9:1。绿化带两侧设有豁口,机动车道与 非机动车道汇流均进入绿化带中。现将车道面层更换 为透水沥青材质;原有绿化带更换为生物滞留带,具 体参数设置均与试验相同,计算改造后生物滞留带的 水文控制效果。

4.3 效果分析

经测定,试验滞留带土壤饱和容水度为 39.9%。 试验滞留带种植土壤体积为 2 m³,则土壤从完全干 燥状态渐变至吸水饱和状态,可吸纳约 0.8 m³ 的雨 水。根据面积占比,对滞留带入流量进行折减计算 后,以式(18)及试验结果为依据,对不同溢流高度 (5 cm、10 cm、15 cm)、不同降雨重现期(*P*=1 年、 3 年、5 年、10 年)、不同种植土干燥程度(完全干 燥、吸水饱和)条件下,该道路进行海绵化改造后的 滞留带溢流总量、穿孔管出流总量及雨水调蓄比例进 行计算,结果如表 8 所列。



图 13 道路横断面(单位: m)

	重现期 /年	滞留带入流量/m ³		滞留带溢流量/m ³		穿孔管出流量/m ³			渗蓄总量占降雨量比例/%				
		5 cm	10 cm	15 cm	5 cm	10 cm	15 cm	5 cm	10 cm	15 cm	5 cm	10 cm	15 cm
	1	10.60	10.60	10.60	_	_		10.60	10.60	10.60	30	30	30
土壤吸	3	16.80	16.96	17.64	5.20	1.20	_	11.60	15.80	17.60	23	31	35
水饱和	5	20.60	21.81	19.91	8.20	4.00	_	12.40	17.80	20.00	22	31	35
	10	25.40	26.56	26.51	11.60	7.60	5.00	13.80	19.00	21.60	21	28	33
	1	10.60	10.60	10.60							30	30	30
土壤完	3	16.80	16.96	17.64	_	—	_	0.80	1.00	1.60	33	33	35
全干燥	5	20.60	21.81	19.91	_	_	_	4.60	5.80	4.00	36	38	35

1.80

6.00

8.80

道路滞留带流量统计及渗蓄比例(以100 m 为单位) 表 8

分析渗蓄比例可知,当土壤吸水饱和时,提升溢 流高度可有效增加雨水渗蓄总量,而溢流高度变化对 完全干燥滞留带的影响偏小,在重现期 P = 10 年时 有7%的提升效果。对比滞留带土壤不同持水状态, 由于土壤在下渗过程中不断吸水,故穿孔管出流量大 幅减少; 当土壤完全干燥时,可有效减少滞留带溢流 量,进而提高渗蓄比例。溢流高度越低,提升效果越 明显。该结果可为实际道路优化设计提供一定参考。

26.56

26.51

3.40

5 结 论

10

25.40

(1) 生物滞留带在削减径流总量、削减径流峰值 及延迟峰值时间方面均有着较好的效果,在小重现期 (P≤1年)条件下,削减效果尤为突出;存水区高度 提升后,径流总量削减率均有所提升。

(2) 不同渗流流量 – 时间曲线存在相似的变化规 律,分为上升、平稳、下降阶段,分析后可知在滞留 带结构层确定的前提下,滞留带存水区高度为决定因 素。渗流时间与存水区水头持续时间相对应,溢流高 度增加,渗流总历时、平稳期渗流流量值、平稳期持 续时间均对应增加。渗透速率与存水区水头高度、存 水区水头高度与时间均满足一次函数关系。设置一定 的溢流高度有助于优化滞留带雨水调蓄效果。

对于雨量充沛地区,滞留带土壤经常处于饱和状 态,此时存水区高度对滞留带的径流调蓄渗透效果有 着重要影响,增加水头高度可有效解决滞留带对长历 时、高强度降雨调蓄能力较差的问题,相对应的,种 植植物也应以耐淹型植物为主;而对于干旱地区、降 雨间隔时期较长,导致雨季滞留带土壤常处于较干燥 状态,此时则应以调节滞留带结构层为主要手段,以 涵蓄雨水为主要目的进行设计,尽量延迟穿孔管出流 时间。生物滞留带影响因素众多,除本文中涉及的降 雨强度变化、存水区间高度变化外,还包括结构层参 数变化、土壤初始含水率、滞留带填料孔隙率、种植 植物选择等内容,应从多角度进行综合考虑,结合试 验、模型模拟、实地观测等数据条件,对生物滞留带 进行合理设计。

10.60

33

37

参考文献:

- [1] 孙艳伟. 城市化和低影响发展的生态水文效应研究[D]. 西安: 西北农林科技大学,2011.
- [2] 杜晓丽,韩强,于振亚,等.海绵城市建设中生物滞留设施应 用的若干问题分析[J]. 给水排水, 2017, 53(1): 54-58.
- [3] HUNT W F , LORD W G. Bioretention performance , design , construction , and maintenance [M]. Raleigh , North Carolina: North Carolina Cooperative Extension, 2006.

40

李芃抒 等//道路生物滞留带径流削减效果的试验研究

- [4] HUNT, W F, JARRETT A R, SMITH J T, et al. Evaluating bioretention hydrology and nutrient removal at three field sites in North Carolina [J]. Journal of irrigation & drainage engineering, 2006, 132(6): 600–608.
- [5] DAVIS A P. Field performance of bioretention: Hydrology impact [J]. Journal of hydrologic engineering, 2008, 13(2): 90–95.
- [6] LI H , DAVIS A P. Heavy metal capture and accumulation in bioretention media [J]. Environmental science technology, 2008, 42 (17), 5247–5253.
- [7] 许萍,司帅,张建强,等.深圳光明新区透水沥青道路与滞留
 带对径流水质水量控制效果研究[J].给水排水,2015,51
 (11): 64-69.
- [8] 王浩,谷康,孙新旺,等.城市道路绿地景观规划[M].南 京:东南大学出版社,2005.
- [9] 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.

- [10] 高建平,潘俊奎,谢义昌.生物滞留带结构层参数对道路径流滞蓄效应影响[J].水科学进展,2017,28(5):702-711.
- [11] 殷瑞雪,孟莹莹,张书函,等. 生物滞留池的产流规律模拟研 究[J]. 水文, 2015, 35(2): 28-32.
- [12] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大 学出版社,1988.
- [13] 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司.道路排水性沥 青路面技术规程: DG/TJ 08—2074—2016[S].上海:同济大 学出版社,2016.
- [14] 黄静岩,李俊奇,宫永伟,等.道路生物滞留带削减雨水径流 的实测效果研究[J].中国给水排水,2017,33(11):120-127.
- [15] 张有良. 工程地质手册(第四版 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988.

(责任编辑 王海锋)