

# 改良型下凹绿地对小区雨水径流的调蓄净化效能

裔士刚<sup>1</sup>, 王祥勇<sup>2</sup>, 康威<sup>1</sup>, 姚欣翹<sup>3</sup>, 张昭雄<sup>3</sup>, 邵知宇<sup>1</sup>, 柴宏祥<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 厦门市市政工程设计院有限公司 重庆分院, 重庆 400015; 3. 深圳市越众<集团>股份有限公司, 广东 深圳 518040)

**摘要:** 在传统绿地的基础上,设计了一种改良型下凹绿地,并在深圳市光明新区某绿色建筑小区进行了中试研究。以服务面积比(装置与径流下垫面之比)为控制变量,研究不同重现期下装置对小区雨水径流的水质净化和水量调蓄效果,确定最优服务面积比为1:2。当重现期 $\leq 1$ 年时,出水SS、COD浓度分别为7.64~9.25、15.64~31.98 mg/L,基本满足《建筑与小区雨水利用工程技术规范》(GB 50400—2006)中处理后雨水用于观赏性水体、绿化、冲厕的指标要求,无溢流;当重现期为2年时,出水SS、COD浓度分别为15.18、45.89 mg/L,不能达标。当重现期为2年或3年时,无溢流;当重现期为5年时,产生溢流,产流时间为29 min,延缓峰现时间为14 min。

**关键词:** 下凹绿地; 雨水径流; 重现期; 服务面积比; 水质; 水量

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)05-0134-05

## Storage and Purification of Rainfall Runoff by Modified Concave-down Green Space in Green Building Community

YI Shi-gang<sup>1</sup>, WANG Xiang-yong<sup>2</sup>, KANG Wei<sup>1</sup>, YAO Xin-qiao<sup>3</sup>, ZHANG Zhao-xiong<sup>3</sup>,  
SHAO Zhi-yu<sup>1</sup>, CHAI Hong-xiang<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>*, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. *Chongqing Branch, Xiamen Municipal Engineering Design Institute Co. Ltd.*, Chongqing 400015, China; 3. *Shenzhen Yuezhong <Group> Co. Ltd.*, Shenzhen 518040, China)

**Abstract:** Based on the traditional green space, a modified concave-down green space was designed, and the pilot-scale study was conducted in a green building community in Guangming New District, Shenzhen City. The purification and storage capacity of the rainfall runoff in the green building community under different return periods were investigated using the service area ratio (the ratio of facility to underlying surface area) as a control variable. The optimum service area ratio was determined to be 1:2. When the return period was less than 1 year, the effluent concentrations of SS and COD were 7.64 to 9.25 mg/L and 15.64 to 31.98 mg/L, which could basically meet the requirements for ornamental water, greening and toilet flushing in the *Engineering Technical Code of Rainwater Utilization in Building and Sub-district* (GB 50400-2006), and there was no overflow. When the return period was 2 years, the effluent concentrations of SS and COD were 15.18 mg/L and 45.89 mg/L, which could not meet the

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2010ZX07320-001)

通信作者: 柴宏祥 E-mail: chaihx@cqu.edu.cn

standard. When the return period was 2 years or 3 years, there was no overflow. When the return period was 5 years, the rainfall overflow occurred, with overflow time of 29 min, and the time of delaying peak was 14 min.

**Key words:** concave-down green space; rainfall runoff; return period; service area ratio; water quality; water quantity

随着城市化的不断发展,城市绿地率不断降低,不透水面的增加使雨水径流污染日益严重,各大城市“看海”现象频发。在此背景下,低影响开发技术愈加受到重视。低影响开发设施主要包括雨水花园、生物滞留设施、绿色屋顶、植被浅沟、下凹式绿地等。其中,下凹式绿地改变了传统绿地模式,利用下凹空间充分蓄集下渗雨水、削减洪峰流量、减轻地表径流污染,有效增加了雨水下渗时间,是一种绿地雨水调蓄技术<sup>[1,2]</sup>。海绵城市建设指南中关于下凹式绿地对污染物的去除率并没有涉及到,而黄民生等<sup>[3]</sup>的研究表明,下凹式绿地不仅具有调蓄功能,对城市径流污染物的去除也有一定影响。《建筑与小区雨水利用工程技术规范》(GB 50400—2006)中规定了在不同用途下雨水经处理后 COD 和 SS 指标的限值,且相关研究表明,SS 和 COD 的去除与雨水中其他污染物的去除有一定的相关关系<sup>[4]</sup>,因此对 SS 和 COD 的去除效能分析具有实际意义。

笔者基于低影响开发理念,在传统下凹式绿地的基础上设计了改良型下凹式绿地,并通过试验比较了其在不同重现期、不同服务面积比下对城市径流中 SS、COD 的去除效果,同时分析了其对流量调蓄的影响,以期获得该设施在建筑小区实际应用中的设计参数。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

改良型下凹式绿地试验装置包括 4 个处理单元,装置外围为不透水混凝土墙,内部为低影响开发生态雨水处理措施,如图 1 所示。纵向结构由上至下依次为:蓄水层、草坪层、基质土壤层、细砂层、陶粒层及集水支管卵石层。蓄水层高度取 10 cm,并以适宜当地生长的台湾草为植被;将砂和粘土按体积比为 1:1~1:1.5 混合,使改良土壤的渗透系数达到  $2.5 \times 10^{-5}$  m/s,土壤层厚度取 50 cm;细砂层和填料层的厚度分别为 10 和 15 cm,填料选用有较大比表面积的陶粒;集水支管卵石层主要用于保护穿孔管,以防止其堵塞,厚度为 10 cm。在集水支管

卵石层中埋置直径为 50 mm 的 PVC 穿孔管,穿孔后用土工布包裹防止堵塞,穿孔排水管理设时设置 0.5% 的纵向坡度。

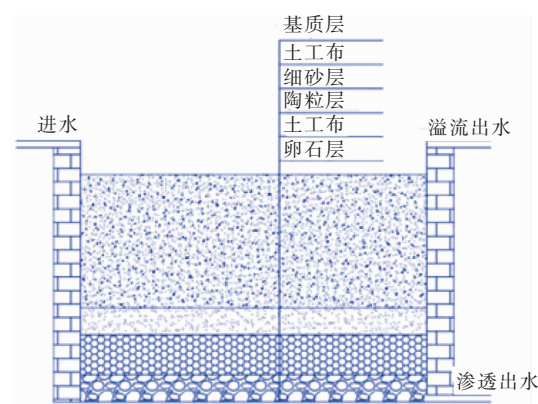


图 1 试验装置

Fig. 1 Diagram of experimental device

试验以屋面为研究下垫面,在屋面上铺撒道路清扫的垃圾,用于模拟建筑与小区道路下垫面状况。装置面积为定值,通过控制不同面积屋面的径流以实现对服务面积比的控制。

### 1.2 模拟降雨设计

基于城市暴雨强度公式,应用芝加哥降雨过程线对深圳市的降雨进行模拟。

### 1.3 水质检测和评价方法

采集改良型下凹式绿地水样后,立即带回试验室置于 4 ℃ 的冰箱中冷藏保存,并在 24 h 内完成水质分析。所有水质指标均采用国家标准方法进行测定。

一次径流污染过程中污染物浓度变化范围大、随机性强,一般以一次降雨径流污染的平均浓度 (EMC)<sup>[5]</sup>,即总污染量与总径流量之比作为评价径流水质的标准,其计算方法如下:

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^T C_t Q_t dt}{\int_0^T Q_t dt} \approx \frac{\sum C_t Q_t \Delta t}{\sum Q_t \Delta t} \quad (1)$$

式中,EMC 为场次降雨径流污染物平均浓度,mg/L;V 为径流总体积,m<sup>3</sup>;t 为时间,min;M 为污染物质量,g;Q<sub>t</sub> 为间隔时间内的径流量,m<sup>3</sup>/s;C<sub>t</sub> 为间

隔时间内的污染物浓度,  $\text{mg/L}$ ;  $\Delta t$  为采样间隔时间,  $\text{min}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水质净化效能分析

SS 和 COD 为雨水径流的主要污染指标,故重点考察了不同降雨重现期(0.33、0.5、1、2年)、不同服务面积比(1:1、1:2、1:3、1:5)情况下改良下凹绿地装置对雨水径流中 COD 和 SS 的去除效果。

#### 2.1.1 SS 去除效果

改良型下凹式绿地装置对雨水径流中 SS 的去除效果见图2。限于篇幅,图中只列出了服务面积比为1:1和1:5时的数据;另外,水平红线为 GB 50400—2006 中观赏性水体、绿化、公厕对 SS 的限值要求(10  $\text{mg/L}$ )。

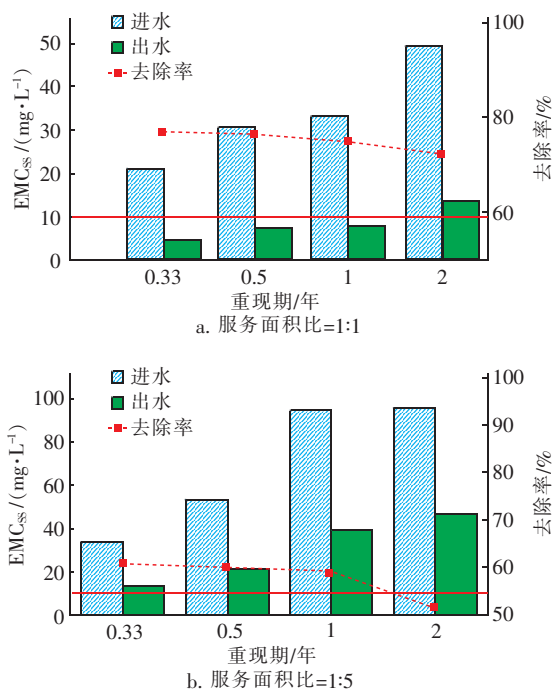


图2 改良型下凹式绿地装置对 SS 的去除效果

Fig. 2 Removal of SS by modified concave-down green space

该试验模拟的是小区道路雨水径流,水质较差,当重现期较小时,试验装置进水  $\text{EMC}_{\text{ss}}$  值(SS的 EMC 值)较小,可能是由于降雨强度较小,冲刷作用不明显,污染物未能完全冲刷;随着重现期的不断增大,进水  $\text{EMC}_{\text{ss}}$  值不断升高,污染物冲刷和淋洗较完全,而出水  $\text{EMC}_{\text{ss}}$  值亦不断增大,去除率逐渐降低,这可能是由于降雨强度随之增大,雨水径流量增多,雨水在装置中的停留时间缩短,导致去除效果不佳。

当重现期为2年时,对 SS 的去除率为 51.4% ~ 71.4%,出水  $\text{EMC}_{\text{ss}}$  值为 13.7 ~ 46.81  $\text{mg/L}$ ,4 个服务面积比下出水 SS 均未达标;当重现期  $\leq 1$  年时,对 SS 的去除率为 59.0% ~ 77.1%,出水  $\text{EMC}_{\text{ss}}$  值为 4.87 ~ 38.84  $\text{mg/L}$ ,服务面积比为 1:1、1:2、1:3 时出水 SS 浓度基本达标,说明该下凹式绿地对重现期  $\leq 1$  年的降雨径流中的 SS 去除效果较好。

另外,在重现期一定的情况下,随着服务面积比的增大,装置出水  $\text{EMC}_{\text{ss}}$  值也不断增大,由面积比为 1:1 时的 4.87 ~ 13.7  $\text{mg/L}$  升至面积比为 1:5 时的 13.28 ~ 46.81  $\text{mg/L}$ ;SS 去除率亦呈下降趋势,由面积比为 1:1 时的 77.1% ~ 72.4% 降至面积比为 1:5 时的 51.4% ~ 60.6%,这可能是因为随着服务面积比的增大,装置进水流量增大,导致雨水在装置中的停留时间缩短,处理不完全即渗透出水或直接溢流出水。在服务面积比为 1:1、1:2、1:3 的条件下,当重现期  $\leq 1$  年时,对 SS 的去除率为 62.2% ~ 77.1%,出水  $\text{EMC}_{\text{ss}}$  值为 4.87 ~ 10.51  $\text{mg/L}$ ,基本满足要求;当服务面积比为 1:5 时,即便是在重现期为 0.33 年的小雨情况下,出水  $\text{EMC}_{\text{ss}}$  值为 13.28  $\text{mg/L}$ ,仍然不能达标。这说明当服务面积比为 1:1、1:2、1:3 时装置对重现期  $\leq 1$  年的降雨径流处理效果较好。此外,过大的服务面积也可能使得绿化率不能达到我国绿色建筑与小区要求的 30%。

#### 2.1.2 COD 去除效果

改良型下凹式绿地装置对雨水径流中 COD 的去除效果见图3。同样限于篇幅,图中只列出了服务面积比为 1:1 和 1:5 时的数据;另外,水平红线为 GB 50400—2006 中观赏性水体、绿化、公厕对 COD 的限值要求(30  $\text{mg/L}$ )。

随着重现期的不断增大,降雨强度增大,径流所携带的污染物增多,因此进水  $\text{EMC}_{\text{COD}}$  值(COD 的 EMC 值)不断增大;同时出水  $\text{EMC}_{\text{COD}}$  值亦逐渐增加,COD 去除率呈下降趋势。随着重现期由 0.33 年增大到 2 年,服务面积比为 1:1 时的 COD 去除率由 54.1% 降到 44.9%,服务面积比为 1:5 时的 COD 去除率则由 35.5% 降到 27.6%。这可能是由于重现期增大,降雨强度增大,雨水径流量增多,在装置中停留时间减少,使得土壤微生物的分解和填料层的吸附作用减弱,污染物去除率降低。当重现期  $\leq 1$  年时,出水  $\text{EMC}_{\text{COD}}$  值为 9.76 ~ 47.91  $\text{mg/L}$ ,COD 去除率为 33.5% ~ 54.1%,服务面积比为 1:1

和1:2情况下出水COD基本可以达标;当重现期为2年时,出水 $EMC_{COD}$ 值为41.91~61.84 mg/L,去除率为27.6%~44.9%,均不能达标。再次表明装置对重现期 $\leq 1$ 年的降雨径流处理效果较好。

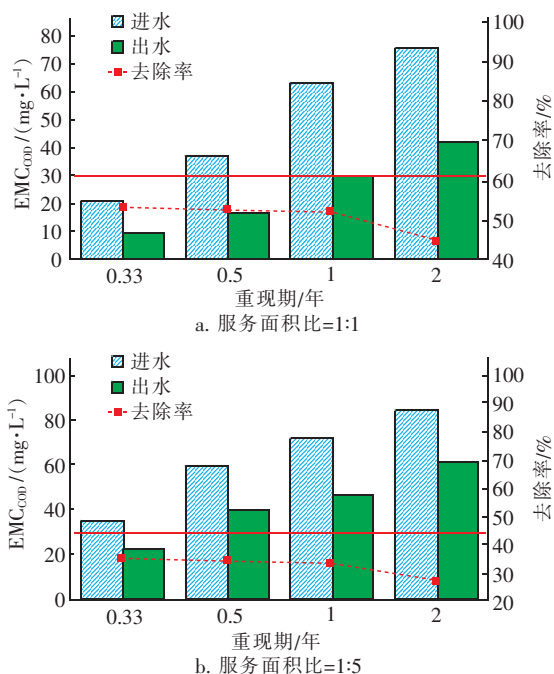


图3 改良型下凹式绿地装置对COD的去除效果

Fig.3 Removal of COD by modified concave-down green space

在重现期一定的情况下,随着服务面积比的增加,装置进水 $EMC_{COD}$ 值基本呈增长趋势,COD去除率呈下降趋势,这与SS的变化规律一致。在服务面积比为1:1和1:2时,重现期 $\leq 1$ 年的出水 $EMC_{COD}$ 值为9.76~31.98 mg/L,基本可达标;当服务面积比为1:3时,重现期 $\leq 1$ 年的出水 $EMC_{COD}$ 值为17.05~29.28 mg/L,满足出水要求;当服务面积比为1:5时,仅重现期为0.33年的出水 $EMC_{COD}$ 值可以达标,为22.99 mg/L。因此为了防止该装置处理水质的过度局限,服务面积比不宜过大。

## 2.2 水量调蓄效能分析

在不同降雨重现期(1、2、3、5年)、不同服务面积比(1:1、1:2、1:3、1:4、1:5)条件下,改良型下凹式绿地装置对雨水径流的调蓄效果见图4。限于篇幅,只列出重现期为1年和5年时的数据。

该试验模拟降雨历时为60 min,从降雨初始即产生径流,峰值出现在24 min左右。经过装置之后,部分径流被消纳,部分溢流出水产生径流,产流时间和峰现时间也都有不同程度的延迟。在重现期

为1年的情况下,当服务面积比为1:1、1:2、1:3、1:4时雨水径流完全被消纳(在图中表示为径流流量始终为零的直线),只有当服务面积比为1:5时才会产生径流,产流时间为39 min,延迟峰现时间为24 min,峰值流量为268 mL/s;在重现期为2年的情况下,服务面积比为1:1、1:2、1:3时无溢流,当服务面积比为1:4和1:5时产生径流,而且随服务面积比的增大,产流时间由35 min减少到30 min,延迟峰现时间由20 min降到15 min,峰值流量由192 mL/s增加到308 mL/s;在重现期为3年的情况下,服务面积比为1:1和1:2时无溢流,当服务面积比为1:3、1:4和1:5时产生径流,而且随着服务面积比的增大,产流时间由33 min减少到27 min,延迟峰现时间由18 min降到12 min,峰值流量由262 mL/s增至456 mL/s;在重现期为5年的情况下,只有在服务面积比为1:1时径流才能完全被消纳,服务面积比为1:2、1:3、1:4和1:5时都会产生径流,而且随着服务面积比的增大,产流时间由29 min减少到23 min,延迟峰现时间由14 min降到8 min,峰值流量由150 mL/s增加到700 mL/s。

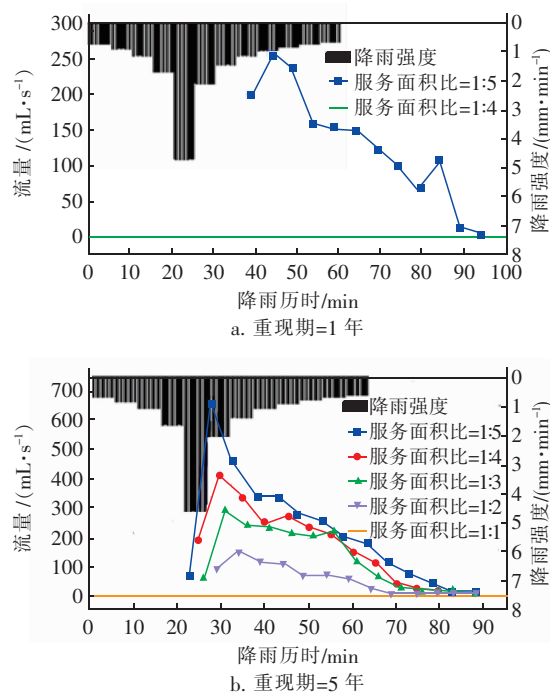


图4 改良型下凹式绿地装置对雨水径流的调蓄效果

Fig.4 Rainfall runoff storage capacity of modified concave-down green space

综上所述,随着重现期的增加,产流时间提前,延迟峰现时间减少,峰值流量增大,装置对雨水的调



蓄作用减弱。分析原因是,随着重现期增大,降雨强度增大,装置来不及消纳径流,过量的雨水通过溢流排出产生径流。此外,随着服务面积比的增大,装置产流时间减少,峰现时间提前,径流洪峰增大,调蓄效果减弱。这是因为服务面积比增大,雨水径流量增大,来不及渗透的径流将直接溢流出去,起不到调蓄径流的作用,因此装置调蓄雨水的规模也随之减小。

### 2.3 维护

在维护方面,在下凹式绿地建成初期的数月定期检查植物长势,做好播种填补;之后每半年检查是否出现侵蚀现象。每年应及时清除下凹式绿地底部的沉积物,在进口铺设卵石防止堵塞。对于本地草坪每年只需在早春进行一次修葺,其他植物则需进行若干次修葺。尽量不施肥,如前期土壤试验时确实需要施肥,应在初春或秋末进行,并且避免施用含磷化肥。在维护管理过程中尤其要注意以下方面:补种修剪植物、清除杂草;进水口、溢流口存在冲刷造成的水土流失现象时,设置碎石缓冲或采取其他防冲刷措施;进水口、溢流口存在堵塞或淤积导致的过水不畅现象时,及时清理垃圾与沉积物;调蓄空间存在沉积物淤积导致的调蓄能力不足时,清理沉积物;边坡出现坍塌时进行加固;由于坡度导致调蓄空间的调蓄能力不足时,应增设挡水堰或抬高挡水堰和溢流口高程;调蓄空间雨水的排空时间超过36 h时,置换部分种植土;出水水质不符合设计要求时应更换填料;严禁向雨水收集口和低影响开发雨水设施内倾倒垃圾、生活污水和工业废水,严禁将城市污水管网接入低影响开发设施。

### 3 结论

① 改良型下凹绿地装置对重现期 $\leq 1$ 年的降雨径流的净化效果较好,当服务面积比为1:1、1:2和1:3时,处理出水的 $EMC_{ss}$ 值为4.87~10.51 mg/L,去除率为62.2%~77.1%,基本满足出水要求;当服务面积比为1:1和1:2时,处理出水的 $EMC_{cod}$ 值为9.76~31.98 mg/L,去除率为54.1%~43.7%,基本满足出水要求。

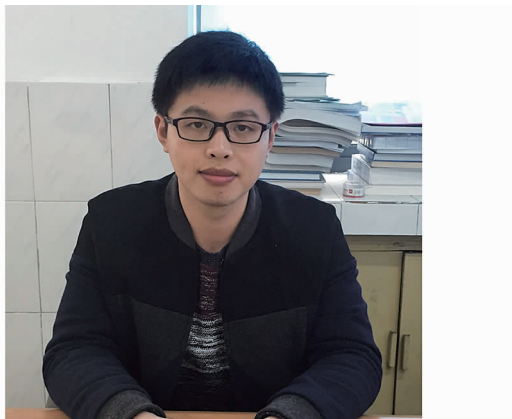
② 减小降雨重现期和服务面积比有利于改良型下凹绿地装置对降雨径流水量的调蓄。当服务面积比为1:1时,不产生溢流;当服务面积比为1:2时,在降雨重现期为1~3年的情况下无溢流;当服务面积比为1:3时,在降雨重现期为1~2年的情

况下无溢流;当服务面积比为1:5时,在降雨重现期为1~5年的情况下均有溢流产生。

③ 综合考虑对降雨径流的水质净化和水量调蓄,推荐改良型下凹绿地装置的服务面积比为1:2,在此条件下,当重现期 $\leq 1$ 年时,出水 $EMC_{ss}$ 、 $EMC_{cod}$ 值分别为7.64~9.25、15.64~31.98 mg/L,去除率分别为72.5%~70.6%、46.4%~43.7%,基本满足出水要求且无溢流;当重现期为2年时,出水 $EMC_{ss}$ 、 $EMC_{cod}$ 值分别为15.18和45.89 mg/L,去除率分别为66.7%和36.9%,水质不能达标;当重现期为2~3年时,径流被完全消纳,当重现期为5年时,产流时间为29 min,延缓峰现时间为14 min。

### 参考文献:

- [1] 马姗姗,庄宝玉,张新波,等. 绿色屋顶与下凹式绿地串联对洪峰的削减效应分析[J]. 中国给水排水, 2014,30(3):101-105.
- [2] 张炜,车伍,李俊奇,等. 图解法用于雨水渗透下凹式绿地的设计[J]. 中国给水排水,2008,24(20):35-39.
- [3] 黄民生,朱勇,谢冰,等. 下凹式绿地调蓄净化城市径流[J]. 建设科技,2010,(1):65-67.
- [4] 张亚东,车伍,刘燕,等. 北京城区道路雨水径流污染指标相关性分析[J]. 城市环境与城市生态,2003,16(6):182-184.
- [5] Zhao J, Shan B, Yin C. Pollutant loads of surface runoff in Wuhan City Zoo, an urban tourist area[J]. J Environ Sci, 2007,19(4):464-468.



作者简介: 裔士刚(1993-), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要从事低影响开发雨水系统研究。

E-mail: yishigang123@126.com

收稿日期: 2016-07-05