

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2018. 05. 02

基于 SWMM 模型的 LID 措施年 SS 总量去除率计算

吴海春,胡爱兵,任心欣

(深圳市城市规划设计研究院有限公司,广东 深圳 518000)

摘要:由于 SWMM (storm water management model) 模型在进行污染物模拟时并未考虑 LID (low impact development) 措施的净化作用,致使计算年 SS 总量去除率时存在较大误差,为弥补该误差,本研究提出了一种基于 SWMM 模型并考虑 LID 措施净化作用的年 SS 总量去除率值计算方法。以深圳市玉田河流域为例,构建 SWMM 模型,结果表明,年 SS 总量去除率值不考虑 LID 措施净化作用时为 23.2%,考虑 LID 措施净化作用时为 30.1%,后者为前者的 1.3 倍。同时论述了年径流总量控制率和年 SS 总量去除率的概念差异,指出两者之间并无确定比例关系。因为 LID 主要截留初期中小降雨,在考虑初期雨水冲刷效应的情况下,典型地块年 SS 总量去除率值可能大于年径流总量控制率值。

关键词:LID 措施;SWMM 模型;净化作用;年 SS 总量去除率;年径流总量控制率

中图分类号:P349 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933 (2018) 05 - 0009 - 04

Calculation of total removal rate of SS by LID measures based on SWMM

WU Haichun, HU Aibing, REN Xinxin

(Urban Planning & Design Institute of Shenzhen, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Because SWMM (storm water management model) does not consider the purification effect of LID (low impact development) measures in pollutant simulation, there is a big error in calculating the annual total removal rate of SS. In order to compensate for this error, a method for calculating the total removal rate of SS based on SWMM and considering the purification effect of LID measures was proposed. Taking Yutian River Basin in Shenzhen City as an example, SWMM was constructed. The results show that the total removal rate of SS is 23.2% without considering the purification effect of LID measures, 30.1% with considering the purification effect of LID measures, and the latter is 1.3 times the former. Meanwhile, the conceptual differences between annual total runoff control rate and annual total removal rate of SS are discussed. It is pointed out that there is no definite proportional relationship between them. The total removal rate of SS in typical plots may be higher than the annual total runoff control rate when the initial rainfall scouring effect is considered and the LID measures mainly intercept early small and medium rainfall.

Key words: LID measure; SWMM; purification effect; annual total removal rate of SS; annual total runoff control rate

随着大家对海绵城市认识的不断深入,由降雨引起的非点源污染也越来越受人们的关注。目前,由于雨水下渗过程的复杂性,普遍利用 SWMM (storm water management model) 模型计算年径流总量控制率(K)和年 SS 总量去除率(S),由于 SWMM

模型在对污染物进行模拟时并未考虑 LID 措施对污染物的净化作用,致使模型法在 S 值计算中存在较大误差^[1-3]。鉴于此,研究基于 SWMM 模型并考虑 LID 措施净化作用的 S 值计算方法就显得十分必要和迫切。本文以深圳市玉田河流域为例,建立

作者简介:吴海春(1988—),男,工程师,硕士,主要从事市政规划设计相关研究。E-mail: whcscut@163.com

SWMM 模型,介绍其在 S 值计算中考虑 LID 措施净化作用的方法,并对 K 值和 S 值的关系进行研究。

1 SWMM 模型计算原理

SWMM 模型为美国环境保护局 (United States Environmental Protection Agency, USEPA) 在 1971 年与梅特 M&E 有限公司、美国水资源与水环境有限公司 (Water Resource and Environment, WRE) 和美国佛罗里达大学 3 家单位联合开发的一个动态的降雨径流模拟软件^[4]。经过几十年的发展升级,SWMM 模型已经升级至 5.1 版本,可以模拟水文、水力、水质情况,能实现 LID 措施对排水系统的影响效果评估、LID 措施对暴雨径流滞留与径流污染控制效果评价以及 LID 设施结构尺寸的设计等方面的功能。

1.1 LID 措施计算原理

SWMM 模型将 LID 措施概化为一个蓄水池,不同的 LID 措施由不同的层组成。本研究以生物滞留池(图 1)为例,介绍 LID 计算原理。其他 LID 措施类似,可参看文献[1]、[4]。

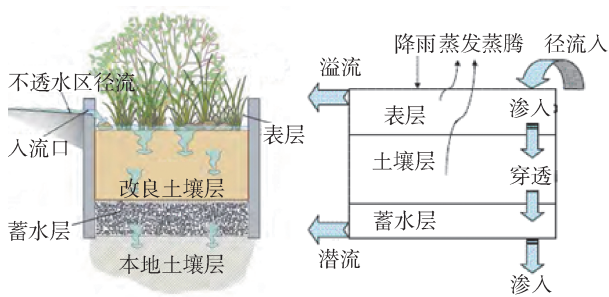


图 1 生物滞留池概化图

生物滞留池包括表层、土壤层、蓄水池和排水层,其中蓄水池和排水层可选,各层层内蓄水池水深和土壤含水量等通过水量平衡方程计算,具体各层之间水量交换概化方式如下:①表层与溢流之间,当下渗速率小于进水速率时,表层水深开始增加,当表层水深达到表层厚度时,LID 措施开始通过表层向外溢水;②表层与土壤层之间,随着表层雨水向土壤层下渗,土壤层土壤含水量开始逐步增加,当达到所设置的饱和含水量时,土壤中水分开始向蓄水池下渗;③土壤层与蓄水池之间,随着土壤层雨水向蓄水池下渗,蓄水池水深开始增加;④蓄水池与潜流之间,随着蓄水池水深的增加,当达到所设置的溢流水深时,蓄水池开始向外排水。

1.2 污染物计算原理

SWMM 模型在计算污染物时,将子汇水区划分为若干下垫面,针对每种下垫面将污染物模拟分为人工清扫、污染物累积和污染物冲刷 3 个过程。其中人工清扫过程需设置清扫时间间隔、可清除比例、

模拟时间距上次清扫时间等参数。为确定每个子汇水区中各下垫面面积,需输入每个子汇水区各下垫面所占比例。污染物累积过程以时间为自变量,污染物累积量为因变量,累积量分别为时间的幂函数、指数函数、饱和函数、外部时间序列等 4 种累积形式逼近最大累积量^[5]。污染物冲刷过程提供了指数函数、径流特性冲刷曲线和次降雨平均浓度法 3 种冲刷函数。其中,径流特性冲刷曲线和次降雨平均浓度法仅考虑了径流量对冲刷过程的影响,指数函数冲刷方程是唯一同时考虑污染物累积量和降雨径流量对冲刷过程影响的方程,故一般常用指数函数方程。

2 考虑 LID 措施净化作用的思路

LID 措施可从两个方面削减污染物:①LID 措施促进雨水下渗或蓄存部分雨水,径流量减少,而径流量中携带有污染物,径流量减少导致污染物减少;②LID 措施对雨水水质有净化作用,可使溢流雨水中污染物浓度降低,致使溢流雨水污染物总量减少。SWMM 模型在对污染物进行模拟时仅考虑了前者,未考虑到后者。冲刷参数中 BMP (best management practices) 去除效率主要指 LID 措施对污染物的去除效率,欲实现考虑 LID 措施对雨水水质的净化作用的污染物模拟,需新建 LID 下垫面,并设置对应的 BMP 去除效率,调整对应下垫面比例。如假设某子汇水区未添加 LID 措施时下垫面划分及所占比例为道路 30%、屋顶 40%、绿地 30%,进行 LID 改造,将 50% 的屋顶改造为绿色屋顶,需新建绿色屋顶下垫面,绿色屋顶与屋顶的参数除 BMP 去除率外其他均保持一致,绿色屋顶 BMP 去除率取 75%。考虑 LID 措施净化作用后的下垫面所占比例分别为道路 30%、屋顶 20%、绿地 30%、绿色屋顶 20%。

3 SWMM 模型构建

3.1 研究区域概况

研究区域为玉田河流域,位于国家低影响开发示范区——深圳市光明新区,玉田河为茅洲河上游一级支流,总面积 13.6 km²,属海洋性热带季风气候,盛行季风,夏、秋季节常受台风影响。年均气温 22℃,多年平均相对湿度 79%,年均水面蒸发量为 1345.7 mm。年降雨量约为 1700~2000 mm,降雨量季节分配极不均衡,主要集中在 4—9 月,这几个月的降雨量占全年降水的 85% 以上。

3.2 模型构建

根据研究区域管网图提取检查井和管网,但考虑到雨水篦子仅具有收水功能,较多短管则模型易不稳定,故将雨水篦子删除,并合并较短管网^[4,6]。

根据研究区域地形图、道路、管线及建筑物分布等对其进行子汇水区划分,由于研究区域地势平坦,在子汇水区划分过程中更加重视街道和社区单元的分布情况,将较小子汇水区调整合并共划分为 194 个子汇水区、186 个节点、185 根管道。

子汇水区参数主要可分为确定性参数和不确定性参数,如坡度、面积、下垫面比例等为确定性参数,不确定性参数可参考相同或相近地区其他学者所做的研究。根据地形图等资料计算各子汇水区的平均坡度,并结合遥感影像图提取各子汇水区道路、屋顶和绿地等下垫面所占比例,计算确定性参数。因玉田河流域紧邻鹅颈水流域,不确定性参数参考吴亚男等^[7]在鹅颈水流域所做研究,具体水动力参数和 SS 模拟参数见表 1 和表 2。

表 1 水动力参数取值

参数名称	物理意义	取值
N-Imperv	不透水区曼宁系数	0.011
N-Perv	透水区曼宁系数	0.05
Destore-Imperv	不透水区注蓄水深度	1.27 mm
Destore-Perv	透水区注蓄水深度	2.54 mm
Zero-Imperv	不透水区无洼地不透水区所占百分比	50%
Max rate	最大下渗率	30 ~ 75 mm/h
Min rate	最小下渗率	1.2 ~ 18 mm/h
Decay	渗透衰减系数	2 ~ 7
Drying time	干燥时间	7 h

根据《深圳市海绵城市规划要点和审查细则》,玉田河流域位于深圳市西部雨型区,采用深圳市西部地区年降雨数据和蒸发数据进行计算。各类建设项目 LID 设施比例见表 3。

4 S 值计算

4.1 初期冲刷现象

初期冲刷效应受多种因素影响,雨水径流初期累积输送的污染物占该场次降雨输送污染物负荷总量的比例大于累积输送径流量占该场次降雨输送径

流总量的比例时,即认为存在初期冲刷现象。车伍等^[8]对上百场降雨事件进行统计,发现 83.3% 的降雨事件都发生了初期冲刷现象;李明远等^[9]研究发现存在初期冲刷的情况下,30% ~ 40% 雨水径流携带了 50% ~ 70% 污染负荷;李春林等^[10]研究发现大约有 50% ~ 90% 的降雨事件产生初期冲刷现象;Hall 等^[11]研究发现大约有 60% ~ 80% 的降雨事件产生初期冲刷现象。国内外对初期冲刷效应的判定方法较多,但大多采用无量纲累积 $M(V)$ 曲线方法(式(1))。以该场次累积径流量与径流总量之比为横坐标,以污染物累积负荷与污染物负荷总量之比为纵坐标作图,绘制无量纲曲线图(图 2),当 $M(V)$ 曲线在 45° 对角线之上时,则发生初期冲刷现象,反之不存在初期冲刷现象^[12]。

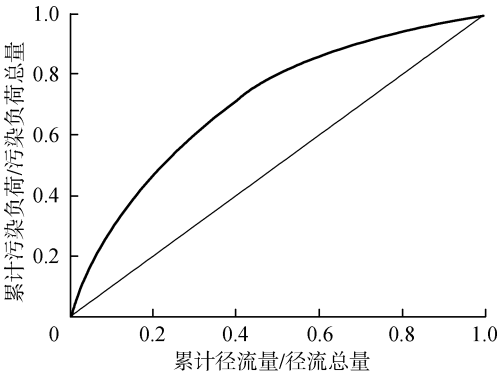


图 2 $M(V)$ 曲线示意图

$$\frac{M(t)}{V(t)} = \frac{\int_0^t Q(t)C(t)dt / \int_0^T Q(t)C(t)dt}{\int_0^t Q(t)dt / \int_0^T Q(t)dt} \tag{1}$$

式中: $M(t)$ 为 t 时刻降雨过程排放的污染负荷量,mg; $V(t)$ 为 t 时刻降雨过程排放的径流量,L; $Q(t)$ 为 t 时刻的瞬时径流量,L/min; $C(t)$ 为 t 时刻的瞬时污染物浓度,mg/L; T 为从降雨产生径流开始至降雨径流结束持续时间,min。

表 2 不同下垫面 SS 模拟参数

下垫面类型	街道清扫			污染物累积		污染物冲刷		
	时间间隔/d	可清除比例/%	模拟时间距上次清扫时间/d	最大累积量/(kg · hm ⁻²)	半饱和累积时间/d	冲刷指数	冲刷系数	BMP 去除效率/%
道路	1	45	1	450	3.0	0.8 ~ 0.9	0.038	0
屋顶	0	0	0	400	5.5	0.8 ~ 0.9	0.036 ~ 0.037	0
绿地	0	0	0	300	10.0	0.3 ~ 0.5	0.030 ~ 0.035	0

表 3 各类建设项目 LID 设施比例

用地类型	下沉绿地比例/%	绿色屋顶比例/%	人行道、停车场、广场透水铺装比例/%	不透水下垫面径流控制比例/%
工业类	18	18	12	46.2
公共 0 建筑类	18	15	14	45.60
居住类	24		18	25.20
道路广场类	24		20	36.64

4.2 初期冲刷现象对 S 值的影响

2014 年 10 月住建部颁布的《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建》中明确提到“年 SS 总量去除率等于年径流总量控制率乘以低影响开发设施对 SS 的平均去除率”^[13],该法默认 S 值与 K 值之间存在比例关系,所以得出的结果 S 值必然小于 K 值。但事实上,S 值和 K 值之间并无该比例关系,SS 的去除率为一个相对概念,等于 LID 截留部分乘以 LID 措施蓄满时的质量初期雨水冲刷效应指数 M_{FF} ^[14],该指数是基于 $M(V)$ 曲线法提出的。采用的 LID 措施比例越大,则 S 值越大。而 K 值主要为下渗雨量加上 LID 控制雨量,除了和采用的 LID 措施比例有关外,还与透水下垫面下渗雨水量等有关,透水下垫面下渗雨水量和 LID 措施比例之和越高则 K 值就越大,具体如图 3 所示。因为 LID 主要截留初期中小降雨,若考虑初期冲刷效应,则单个地块 S 值可能大于 K 值。车伍等^[8]研究也发现,若初期冲刷明显,S 值可能会大于 K 值;若初期冲刷不明显,则 S 值小于 K 值。

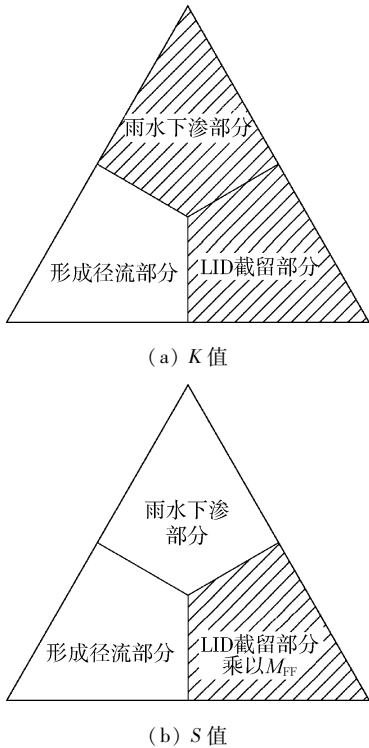


图 3 K 值和 S 值概念差异 (阴影部分代表包含区域)

4.3 玉田河流域 S 值计算

添加透水铺装、绿色屋顶、下沉绿地等 3 种 LID 措施分别用于改造道路、屋顶、绿地,新建透水铺装、绿色屋顶、下沉绿地等 LID 下垫面,其水质参数除 BMP 去除率与未改造前下垫面水质参数不同外,其他均与未改造前下垫面水质参数相同。依据相关参考文献^[15]和《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建》,取透水铺装、绿色屋顶和下沉绿

地对 SS 的去除率即 BMP 去除率分别为 85%、75%、60%。按前文所述方法计算考虑和不考虑 LID 净化作用两种情况计算 S 值,可得到在不考虑 LID 净化作用的情况下,S 值为 23.2%;在考虑 LID 净化作用的情况下,S 值为 30.1%,后者为前者的 1.3 倍。

5 结 论

a. S 值与 K 值之间并无直接比例关系。K 值主要与透水下垫面下渗能力及 LID 措施截留总径流量有关;S 值为相对概念,与 LID 措施截留的污染物质及初期冲刷效应有关。因为 LID 措施主要影响初期中小降雨,在考虑初期冲刷效应的情况下,单个地块 S 值有可能会大于 K 值。

b. 以玉田河流域为例进行模拟,在不考虑 LID 净化作用的情况下,S 值为 23.2%;在考虑 LID 净化作用的情况下,S 值为 30.1%,后者为前者的 1.3 倍。

参考文献:

[1] ROSSMAN L A, HUBER W C. Stormwater management model reference manual volume III-water quality [M]. Cincinnati: Environmental Protection Agency, 2016.

[2] 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.

[3] LI H, DAVIS A P. Water quality improvement through reductions of pollutant loads using bioretention [J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, 135 (8) : 567-576.

[4] 黄国如, 麦叶鹏, 李碧琦, 等. 基于 PCSWMM 模型的广州典型社区海绵化改造水文效应研究 [J]. 南方建筑, 2017 (3) : 38-45. (HUANG Guoru, MAI Yepeng, LI Biqi, et al. Study on hydrological effect of typical community sponge transformation based on PCSWMM in Guangzhou [J]. South Architecture, 2017 (3) : 38-45. (in Chinese))

[5] ROSSMAN L A. Stormwater management model user's manual, version 5. 1 [M]. Cincinnati: Environmental Protection Agency, 2015.

[6] 吴海春, 黄国如. 基于 PCSWMM 模型的城市内涝风险评估 [J]. 水资源保护, 2016, 32 (5) : 11-16. (WU Haichun, HUANG Guoru. Risk assessment of urban waterlogging based on PCSWMM model [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (5) : 11-16. (in Chinese))

[7] 吴亚男, 熊家晴, 任心欣, 等. 深圳鹅颈水流域 SWMM 模型参数敏感性分析及率定研究 [J]. 给水排水, 2015, 51 (11) : 126-131. (WU Yanan, XIONG Jiaqing, REN Xinxin. Sensitivity analysis and calibration study on the parameters of SWMM for Ejing Watershed in Shenzhen [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 51 (11) : 126-131. (in Chinese))

(下转第 49 页)

- ZHANG Hui, ZHANG Luocheng, et al. Impact of water conservancy projects on eco-hydrological regime of Tarim River based on improved RVA method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45 (3): 189-196. (in Chinese)
- [12] POFF N L, RICHTER B D, ARTHINGTON A H, et al. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards [J]. Freshwater Biol, 2010, 55: 147-170
- [13] SUMMERS M F, HOLMAN I P, GRABOWSKI R C. Adaptive management of river flows in Europe: a transferable framework for implementation [J]. Journal of Hydrology, 2015, 531: 696-705.
- [14] 薛联青, 张卉, 张洛晨, 等. 塔里木灌区引水前后环境流特性变化[J]. 水资源保护, 2017, 33 (3): 31-37. (XUE Lianqing, ZHANG Hui, ZHANG Luocheng, et al. Changes in characteristics of environmental flow in Tarim irrigation area before and after water diversion[J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (3): 31-37. (in Chinese))
- [15] 张应华, 宋献方. 水文气象序列趋势分析与变异诊断的方法及其对比[J]. 干旱区地理, 2015, 38 (4): 652-665. (ZHANG Yinghua, SONG Xianfang. Techniques of abrupt change detection and trends analysis in hydroclimatic time-series: advances and evaluation [J]. Arid Land Geography, 2015, 38 (4): 652-665. (in Chinese))
- [16] 赵海瑞, 张佑民. 国家标准《水文基本术语和符号标准》编制说明 [J]. 水文, 1998 (4): 51-53. (ZHAO Hairui, ZHANG Youmin. The state standard formulation of hydrological basic terms and symbol standards [J]. Journal of China Hydrology, 1998 (4): 51-53. (in Chinese))
- [17] 汤成友, 郭丽娟, 王瑞. 水文时间序列逐步回归随机组合预测模型及其应用 [J]. 水利水电技术, 2007, 38 (6): 1-4. (TANG Chengyou, GUO Lijuan, WANG Rui. Application of prediction model for stochastic combination of stepwise regression of hydrologic time series [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38 (6): 1-4. (in Chinese))
- [18] 水利部水文局. 水文情报预报技术手册 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [19] 陶辉, 毛炜峰, 黄金龙, 等. 塔里木河流域干湿变化与大气环流关系 [J]. 水科学进展, 2014, 25 (1): 45-52. (TAO Hui, MAO Wei, HUANG Jinlong, et al. Drought and wetness variability in the Tarim River basin and possible associations with large scale circulation [J]. Advances in Water Science, 2014, 25 (1): 45-52. (in Chinese))
- [20] 张程程. 塔里木河源流和干流径流特征及其相关性分析 [J]. 水利规划与设计, 2016 (1): 50-53. (ZHANG Chengcheng. Runoff characteristics and its correlation analysis between headstreams and mainstream in the Tarim River Basin [J]. Water Resources Planning and Design, 2016 (1): 50-53. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-09-25 编辑: 王 芳)

+++++

(上接第 12 页)

- [8] 车伍, 张鹏, 张伟, 等. 初期雨水与径流总量控制的关系及其应用分析 [J]. 中国给水排水, 2016, 32 (6): 9-14. (CHE Wu, ZHANG Kun, ZHANG Wei, et al. Analysis of initial rainfall and total runoff volume control [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32 (6): 9-14. (in Chinese))
- [9] 李明远, 魏杰, 张武强, 等. 深圳市初期雨水特征分析及控制对策研究 [J]. 广东化工, 2017, 44 (10): 43-46. (LI Mingyuan, WEI Jie, ZHANG Wuqiang, et al. First-flush rainfall in Shenzhen City [J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44 (10): 43-46. (in Chinese))
- [10] 李春林, 刘淼, 胡远满, 等. 沈阳市降雨径流初期冲刷效应 [J]. 生态学报, 2013, 33 (18): 5952-5961. (LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al. Analysis of first flush in rainfall runoff in Shenyang City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (18): 5952-5961. (in Chinese))
- [11] HALL M J, ELLIS J B. Waterquality problems of urban areas [J]. Geojournal, 1985, 11 (3): 265-275.
- [12] 黄国如, 曾家俊, 吴海春, 等. 广州市典型社区单元面源污染初期冲刷效应 [J]. 水资源保护, 2018, 34 (1): 8-15. (HUANG Guoru, ZENG Jiajun, WU Haichun, et al. First flush effect of non-point source pollution in Guangzhou typical community unit [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (1): 8-15. (in Chinese))
- [13] 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——低影响开发雨水系统构建 (试行) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [14] MA J S, KHAN S, LI Y X, et al. First flush phenomena for highways: how it can be meaningfully defined [C]// Proceeding of the Ninth International Conference on Urban Drainage, Portland: IWA/IAHR, 2002.
- [15] 刘昌明, 张永勇, 王中根, 等. 维护良性水循环的城镇化 LID 模式: 海绵城市规划方法与技术初步探讨 [J]. 自然资源学报, 2016, 31 (5): 719-731. (LIU Changming, ZHANG Yongyong, WANG Zhonggen, et al. The LID pattern for maintaining virtuous water cycle in urbanized area: a preliminary study of planning and techniques for sponge city [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31 (5): 719-731. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-04-11 编辑: 王 芳)