

# 水力演算方法对 SWMM 模型排放口出流的影响

王彤<sup>1,2,3</sup>, 丁祥<sup>1,2</sup>, 蔡甜<sup>4</sup>, 刘文睿<sup>1,2</sup>, 涂杰<sup>1,2</sup>, 吴芬芬<sup>1,2</sup>,  
温桂鑫<sup>1</sup>, 石存杰<sup>1,2</sup>, 吴桐<sup>1,2</sup>, 李从起<sup>1,2</sup>, 孙征<sup>1,2</sup>, 郭肖鹏<sup>5</sup>

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061;  
4. 南昌大学 建筑工程学院, 江西 南昌 330031; 5. 天津中德应用技术大学 航空航天学院, 天津 300350)

**摘要:** 分析了恒定流、运动波和动态波3种演算方法的原理,并以西安某居民小区为研究对象,建立SWMM模型,通过使用实测降雨数据对该模型进行了参数率定。设计4种不同重现期的降雨,分别使用3种演算方法得到排放口的出流过程线,再比较长历时下不同演算方法的运算时间。结果表明:恒定流可用于简单、低精度的模拟,对低重现期或长历时的连续模拟,初期的分析具有一定的参考价值;运动波的短历时模拟结果比恒定流更精确,但此方法也不适用于大重现期降雨的模拟,如果不要求模拟精度高,尤其是对长时间序列的模拟,设置较大的步长,初期的模拟具有很好的参考价值;动态波在低重现期下的精度略高于其他两种演算方法,但在高重现期降雨情况下动态波具有绝对的精度优势,应首选动态波法。

**关键词:** SWMM模型; 演算方法; 雨水系统; 出流量; 降雨历时

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)15-0133-06

## Influence of Routing Methods on Outflow of SWMM Model

WANG Tong<sup>1,2,3</sup>, DING Xiang<sup>1,2</sup>, CAI Tian<sup>4</sup>, LIU Wen-rui<sup>1,2</sup>, TU Jie<sup>1,2</sup>,  
WU Fen-fen<sup>1,2</sup>, WEN Gui-xin<sup>1</sup>, SHI Cun-jie<sup>1,2</sup>, WU Tong<sup>1,2</sup>, LI Cong-qi<sup>1,2</sup>,  
SUN Zheng<sup>1,2</sup>, GUO Xiao-peng<sup>5</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;  
2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region <Ministry of Education>, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 4. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 5. School of Aeronautics and Space, Tianjin Sino-German University of Applied Sciences, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** The principles of steady flow, kinematic wave and dynamic wave were analyzed. A SWMM model was built for a residential area in Xi'an. The parameters of the model were calibrated to the measured rainfall and runoff data. Discharge hydrographs were calculated for four different return periods of rainfall using three routing methods. The computation time of the routing methods were compared

for long rainfall duration. Results indicated that the steady flow method was suitable for simple and low precision simulations, and it provided insights to simulations of low return periods or long simulation periods. The kinematic wave method had more accurate simulation result for short rainfall duration than the steady flow, but it also was not suitable for simulation of heavy rainfall events. However, if high simulation precision was not required, especially for a long simulation period, the method could provide a more stable result. The precision of dynamic wave method in low return period was slightly higher than those of the other two methods. When simulating a large return period rainfall event, dynamic wave had absolute advantages regarding the modelling precision and should be the top choice.

**Key words:** SWMM model; routing method; storm sewer system; outflow rate; rainfall duration

暴雨管理模型 SWMM 是由美国环境保护署资助开发的主要用于城市排水和防涝工程规划管理的雨洪模型,在全世界有较广泛的应用<sup>[1]</sup>。SWMM 模型的模拟过程包括地表径流过程模拟、管网输送过程模拟和径流污染过程模拟<sup>[2]</sup>。管网传输系统<sup>[3]</sup>的基本单元包括雨水井、雨水管渠、明渠、涵洞、蓄水池和排放口等。管网输送过程主要是描述雨水汇流后排入雨水管渠并输送到接纳水体或污水处理厂,其核心部分是管网汇流计算。SWMM 模型提供恒定流、运动波和动态波 3 种汇流计算方法。很多人不是很清楚这 3 种演算之间的区别和应用场合,为了操作便利,盲目地选择动态波演算方法。笔者基于 SWMM 模型使用不同演算方法分析出流情况,再对长历时降雨进行模拟,总结 3 种演算方法的区别和应用,旨在为城市雨水系统的分析提供参考。

## 1 管渠汇流原理

### 1.1 圣维南方程

目前,管网汇流的数学模型就是求解圣维南方程组<sup>[4]</sup>,包括能量方程和连续性方程两部分。

能量方程:

$$\frac{v}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} + S_f - S_0 = 0 \quad (1)$$

连续性方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

式中, $H$  为静压水头,  $m$  (1 m 水柱产生的压力约为 10 kPa);  $v$  为断面平均流速,  $m/s$ ;  $x$  为管道长度,  $m$ ;  $t$  为时间,  $s$ ;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $S_0$  为管道底部坡度;  $S_f$  为因摩擦损失引起的能量坡降;  $Q$  为瞬时流量,  $m^3/s$ ;  $A$  为过水断面面积,  $m^2$ 。

其中,式(1)前两项被称为惯性项,第三项称为

扩散项,后两项称为运动项;式(2)的第一项称为流量变化项,第二项为体积变化项。

### 1.2 SWMM 模型演算方法

根据应用建立不同的假设,然后对圣维南方程组进行不同程度的简化,联立简化后的方程组分别求解。SWMM 模型提供了恒定流、运动波和动态波 3 种演算方法。

#### 1.2.1 恒定流

恒定流是最简单的演算方法。首先,假设管渠内每个时刻的水流都是恒定、均匀的,只是将管渠入口处的水流输送到管渠的出口,水流没有延迟和形状上的变化,即忽略了连续方程中的体积变化项,得到式(3)。其次,假设水力坡度等于管渠底的坡度,省略动量方程中的惯性项和扩散项,可得式(4)。

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$S_0 - S_f = 0 \quad (4)$$

联立式(3)、(4),即可得到恒定流解。

#### 1.2.2 运动波

与恒定流相同,运动波也是假设水力坡度与管渠底的坡度相同,同理可得到式(4)。能够输送的最大水流为通过管渠的满负荷流量,由满管的曼宁公式计算。如果入口节点处的水量超出这个流量,超出的部分就直接从系统损失掉或存储在上一个节点的入口处,等该节点水流回落至满负荷流量以下时再重新输入管渠。运动波能模拟管渠中水流随空间和时间的变化,这样可延缓通过管渠的入流和出流曲线。

联立式(2)、(4),则可得到运动波解。

#### 1.2.3 动态波

动态波演算法求解的是完整的圣维南方程组,

所以该方法能模拟壅水等复杂水流状况,这种情况下,水流可超出管渠的满负荷水量。通过 3 种方法对圣维南方程组的简化程度可以看出,相较于恒定流和运动波,动态波更适合复杂水流的计算,它能得到最精确的结果。

联立式(1)、(2),可得到动态波解。

## 2 模型的建立

### 2.1 研究区概况

模型选取西安市某住宅小区作为研究对象。该区总面积为  $6.10 \text{ hm}^2$ ,其中,建筑面积为  $2.56 \text{ hm}^2$ ,绿地面积为  $1.19 \text{ hm}^2$ ,绿化率为 19.51%。区内包括住宅区、停车场、广场、草坪、人工湖、道路等,地势西高东低、北高南低,雨水排放口设置在小区东侧。根据研究区域的地形图,综合考虑土地利用类型并结合 GIS 软件将其划分为 136 个子汇水区,将雨水管网概化为 25 个节点和 25 条管段,管径为 300 ~ 600 mm,管网设计重现期为 2 年。导入 SWMM 模型后,研究区概化结果见图 1。

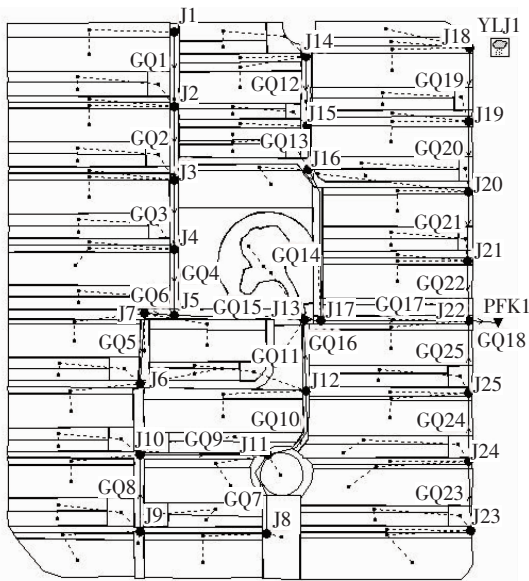


图 1 研究区概化示意

Fig. 1 Sketch map of sub-catchments in study area

### 2.2 设计降雨的确定

合成暴雨过程线的常用方法有芝加哥流量过程线法、Huff 法和 Pilgrim and Cordery 法等。几种常见雨型的对比结果表明,芝加哥雨型在我国具有较好的适用性,所以文中采用芝加哥雨型。西安市的暴雨强度公式<sup>[5]</sup>见式(5),降雨历时取 120 min,峰值系数取 0.375,分别设计 1 年一遇、2 年一遇、3 年一

遇和 10 年一遇 4 种降雨强度。4 种重现期的降雨过程线见图 2。

$$q = \frac{13.27 \times (1 + 2.92 \lg P)}{(t + 21.93)^{0.974}} \quad (5)$$

式中, $q$  为降雨强度,  $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{hm}^2)$ ;  $P$  为重现期,年;  $t$  为降雨时刻, min。

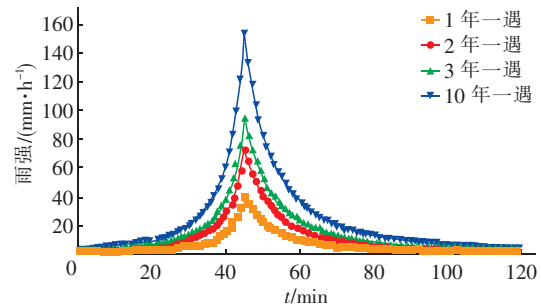


图 2 不同重现期下的降雨过程线

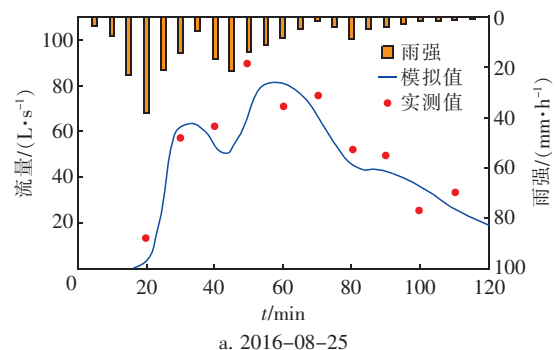
Fig. 2 Rainfall distribution under different return periods

### 2.3 模型参数的确定

SWMM 模型参数主要包括曼宁粗糙系数、注蓄量和入渗率参数等。根据 SWMM 用户手册中各参数的取值范围<sup>[6]</sup>,参考相关研究,通过课题组前期对这些参数取值的率定<sup>[7]</sup>,其计算值与实测值非常接近,也非常符合西安市产流的基本规律。入渗模型选用 Horton 模型,其余参数的取值如下:不渗透区粗糙系数为 0.011、渗透区粗糙系数为 0.03、管段粗糙系数为 0.013、透水地表注蓄量为 12 mm、不透水地表注蓄量为 2 mm、最大入渗率为 76.2 mm/h、最小入渗率为 3.81 mm/h、衰减常数为  $2 \text{ h}^{-1}$ 、无注地蓄水不渗透性比例为 25%。

### 2.4 SWMM 模型的率定及误差分析

选取 2016 年 7 月 24 日和 8 月 25 日两场历时为 2 h 的实测降雨使用动态波演算方法对该水力模型进行率定。其中,8 月 25 日的降雨总量为 18.32 mm,7 月 24 日的降雨总量为 62.40 mm,两场降雨排放口出流量的实测数据和模型拟合结果见图 3。



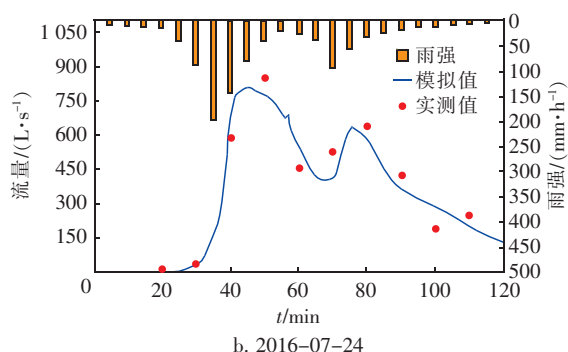


图3 实测数据与模型拟合结果

Fig. 3 Measured data and fitting result of model

通过图3即可初步看出实测值与动态波模拟曲线的拟合情况,具体的吻合程度采用纳什系数 $R_{NS}$ 进行评价。 $R_{NS}$ 接近1,表示模拟质量好,模型可信度高; $R_{NS} > 0.7$ ,表示模拟值与实测值较吻合<sup>[8]</sup>; $R_{NS}$ 接近零,表示模拟结果符合观测值的平均值水准,但模拟结果的误差很大; $R_{NS}$ 远小于零,表示模拟结果是不可靠的。

经计算得到2016-08-25和2016-07-24两场降雨事件的 $R_{NS}$ 分别为0.80、0.91。可知,两场实测降雨动态波模拟结果与实测数据差距不大,纳什系数都在0.8以上,尤其是降水量较大的7月24日降雨事件,纳什系数更是高达0.91,所以可以认为该模型选取的参数是可靠的,能用该模型进行水力分析。

### 3 演算方法的应用与对比

#### 3.1 不同重现期下不同演算方法的特点

##### 3.1.1 不同演算方法在SWMM中的应用

模型选用4个重现期(1、2、3和10年)的降雨进行模拟,雨峰系数取0.375,排放口出流方式选择自由出流,运用3种演算方法,生成对应的出流过程线(排水口的总进流量)和120 min降雨历时内降雨强度的分布,模拟结果见图4。

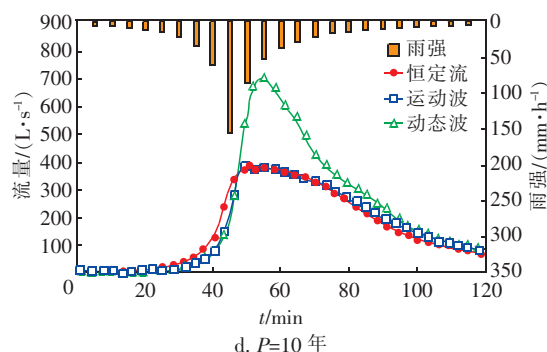
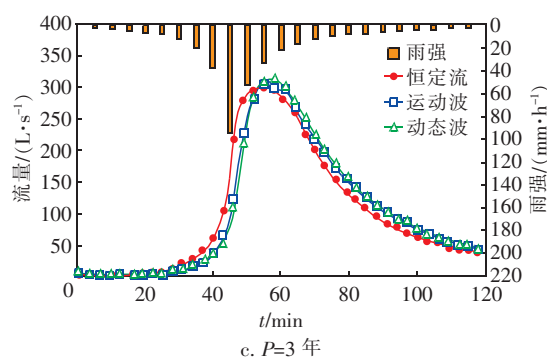
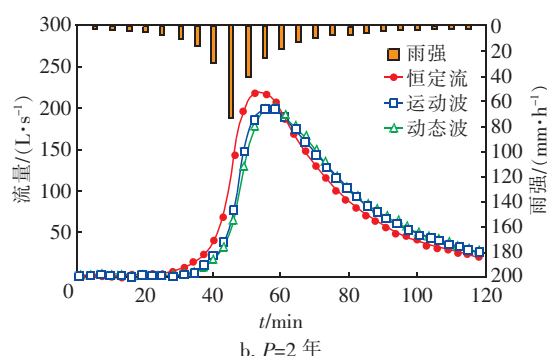
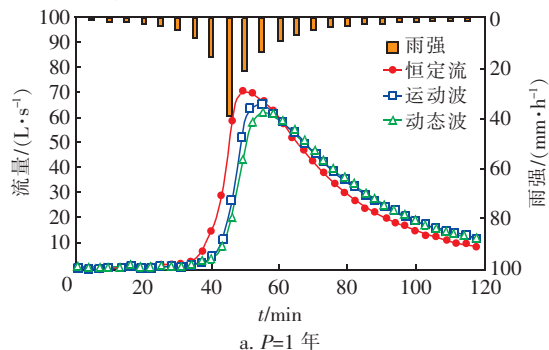


图4 不同重现期下排放口的出流过程线

Fig. 4 Discharge hydrograph at outlet under different return periods

由图4可知,在降雨初期,随着降雨量的增加,出流量不断增大,一般在降雨后50~60 min达到峰值,并且出流量的峰现时间往往晚于降雨的峰值,这是由于降雨后的径流存在地面积水时间和管网汇流时间。由图4(a)、(b)可知,3种演算方法在管网设计重现期下有着相似的规律,即峰现时间:动态波>运动波>恒定流;峰值流量:恒定流>运动波>动态波。当重现期从1年提高到2年,3种演算方法的峰值流量均升高了3倍左右,且峰值流量的比值(恒定流:运动波:动态波)由1.26:1.17:1.00变为1.14:1.02:1.00,这表明低重现期下,随着重现期增大,运动波与动态波的峰值流量基本趋于一致。



致,且二者的出流过程线更为接近;恒定流的峰值流量与其余两种演算方法的比值变小,说明峰值流量的差距在缩小。再由图 4(c)、(d)可知,当降雨量超过管网设计重现期后,出现了不同的出流规律,即峰现时间:动态波 > 运动波 > 恒定流;峰值流量:动态波 > 运动波 > 恒定流。这说明随着重现期增大,恒定流、运动波和动态波的峰值流量差距在缩小,在 3 年重现期下差距已基本不明显。在 10 年高重现期下,恒定流与运动波的出流过程线基本一致,但动态波的出流过程线却较之偏差很大。由图 4(d)可得,动态波的峰值流量高于其余二者的 2 倍左右,峰现时间延迟了约 5 min。

### 3.1.2 原因分析

① 由于恒定流直接把管道上游节点的进流量转化为下游节点进流量,没有时间的延迟或者面积的变化,所以它的出流量峰现时间是最早的。运动波演算考虑到了面积和流量的大小随管道时间和空间上的变化,当进流量在整个管道模拟计算时,导致峰现时间会晚于恒定流。动态波在运动波的基础上又考虑到回水和压力流的影响,故其出流量峰现时间是三者最晚的。则无论降雨的重现期多少,高峰流量出现的时间规律均为:动态波 > 运动波 > 恒定流。

② 3 种演算方法的峰值流量与时间的差异是因为 SWMM 模型是否考虑节点洪流和管道压力的结果,表 1 给出了不同重现期下管网节点的洪流情况。可知,重现期为 1 和 2 年时,由于形成的地面径流量较少,3 种演算方法下均未出现节点溢流和节点超载。因为恒定流没有计算进出口的损失,且未考虑管网汇流时间,流量未在管道中缓冲,致使排放口的出流为瞬时累加流量,所以恒定流的出流量峰值最大。动态波与运动波考虑了管道汇流时间,由于各节点流量在管道中进行了缓冲,所以出流量峰值均小于恒定流。再者,动态波考虑了有压流、回水和逆流等因素,由于主管在满流时变为有压流,支管汇流受阻,使得动态波的峰值流量进一步低于运动波。故小重现期出流量峰值的规律为:恒定流 > 运动波 > 动态波。由表 1 还可知,当重现期较大时,3 种演算方法均出现了节点洪流,特别在 10 年一遇重现期下,动态波的总洪流量约低于恒定流与运动波的 1/8,但其峰值流量却高于二者的 2 倍左右。因为运动波和恒定流水力坡度等于管底坡度,而动态

波没有此限制,当出现节点洪流时,动态波的水力坡度比管渠底坡度大,所以动态波峰值远远大于运动波和恒定流,即动态波 > 运动波  $\approx$  恒定流,且动态波波峰高于运动波波峰的幅度随着重现期的增加而增大。

表 1 不同重现期下的节点洪流

Tab. 1 Node torrent under different return periods

降雨 编号	重现 期/年	总降 雨/mm	节点洪流个数			总洪流量/m <sup>3</sup>		
			恒定流	运动波	动态波	恒定流	运动波	动态波
1	1	12.80	0	0	0	0	0	0
2	2	24.05	0	0	0	0	0	0
3	3	30.64	2	2	0	24	9	0
4	10	50.11	15	14	8	447	437	55

### 3.2 长历时下不同演算方法的特点

设时间步长为 1 min,演算时间为 10 s,选用西安市历时 1 年的日值降雨数据(以 2017 年为例),分别运用恒定流、运动波和动态波 3 种演算方法进行模拟,3 种运算所需时间分别为 197、199、296 s。可知,恒定流和运动波的运算时间非常接近,动态波的运算时间要比前二者多 44.7% 左右。研究区域只是一个居民小区,管网相对简单,当涉及到复杂管网或者历时更长的水力模拟时,动态波和其他两种演算方法的时间差值会非常之大。所以在选用演算方法时,需要在模拟精度和模拟效率之间进行取舍,不能一味地选择动态波方法。在模拟精度要求不高的情况下,这样做反而会降低工作效率。

## 4 结论

① 恒定流不能计算管渠的蓄水、回水、进出口损失、逆流和有压流。此方法可适用于低重现期即不出现节点洪流的情形,因为其出流量峰值更大,更能体现出系统的洪流潜力,可用于简单的短历时模拟。对长历时连续模拟,初期的分析更能反映出管渠的洪水能力。

② 运动波考虑了管道中流量和面积随空间和时间的变化,这种方法使得管道的入流和出流水位过程线延缓,但此演算方法忽略了进出口损失、回水、逆流和有压流的影响。短历时模拟的结果比恒定流更精确。但此方法也不适用于大重现期降雨的模拟,如果不要求模拟精度高,尤其是对长时间序列的模拟,设置较大的步长,初期的模拟具有很好的参考价值,且运算时间比动态波快。

③ 动态波考虑了管道蓄水、回水、进出口损

失、逆流和有压水流,它能更好地模拟发生节点洪流时形成的节点处水头增加和有压水流在管道中的流动问题,所以该方法可以适用于任何流态的管网系统,甚至是复杂的环状管网系统。若出现高重现期降雨,首选动态波法,它能精确地模拟出强降雨产生的径流过程线,但运算时间也最长。

### 参考文献:

- [1] 芮孝芳,蒋成煜,陈清锦,等. SWMM 模型模拟雨洪原理剖析及应用建议[J]. 水利水电科技进展,2015,35(4):1-5.  
Rui Xiaofang, Jiang Chengyu, Chen Qingjin, *et al.* Principle analysis and application of storm water management model on stimulating rainfall-runoff[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(4): 1-5 (in Chinese).
- [2] 祁继英. 城市非点源污染负荷量化研究[D]. 南京:河海大学,2005.  
Qi Jiying. Quantity Study on Non-point Source Pollution of City [D]. Nanjing: Hohai University, 2005 (in Chinese).
- [3] 吴亚男. 基于 SWMM 的海绵城市径流总量控制指标分解及验证[D]. 西安:西安建筑科技大学,2016.  
Wu Ya'nan. Decompose the Control Target of Urban Total Runoff of Sponge City and Validate It by SWMM Model [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016 (in Chinese).
- [4] 梅超,刘家宏,王浩,等. SWMM 原理解析与应用展望[J]. 水利水电技术,2017,48(5):33-42.  
Mei Chao, Liu Jiahong, Wang Hao, *et al.* Introduction of basic principle and application prospect for SWMM [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(5): 33-42 (in Chinese).
- [5] 毕旭,程龙,姚东升,等. 西安城区暴雨雨型分析[J]. 安徽农业科学,2015,43(35):295-297,325.  
Bi Xu, Cheng Long, Yao Dongsheng, *et al.* Analysis on urban rainstorm pattern of Xi'an [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(35): 295-297, 325 (in Chinese).
- [6] Rossman L A. Stormwater Management Model User's Manual Vision 5.0 [M]. Cincinnati: USEPA, 2010.
- [7] 赵欢欢. 城市立交桥雨排系统模拟研究[D]. 西安:长安大学,2013.  
Zhao Huanhuan. Study on the Rain Drainage System Simulation of City Cloverleaf Junction [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013 (in Chinese).
- [8] Bennis S, Crobeddu E. New runoff simulation model for small urban catchments [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2007, 12(5): 540-544.



作者简介:王彤(1965-),男,陕西汉中,硕士,副教授,研究方向为给排水系统优化及人工湿地。

E-mail: wangt@chd.edu.cn

收稿日期:2018-01-15

## 更正

本刊在2018年第34卷第13期发表的文章:雨水花园侧向防渗措施效果的试验与模拟研究,作者应为:袁志明<sup>1</sup>,卢金锁<sup>1</sup>,苏拥军<sup>2</sup>,张荣国<sup>2</sup>,孟庆军<sup>2</sup>,罗文敏<sup>2</sup>(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院,陕西 西安 710055; 2. 南宁轨道交通集团有限责任公司,广西 南宁 530029),特此声明。

(本刊编辑部)