

文章编号:0559-9350(2021)03-0333-08

城市屋顶降雨径流过程单位线模型研究

申红彬^{1,2}, 徐宗学³, 李灵军⁴, 郝秀平¹

(1. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450045;

2. 北京市水科学技术研究院 北京市非常规水资源开发利用与节水工程技术研究中心, 北京 100048;

3. 北京师范大学 水科学研究院 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875;

4. 水利部综合事业局, 北京 100053)

摘要: 城市屋顶按透水性质可分为不透水与绿色(渗透)屋顶。对于绿色屋顶, 基于土壤水饱和下渗理论, 考虑基质土壤层厚度有限性及表面积水深影响, 推导建立了降雨径流过程的单位线模型, 再联合不透水屋顶降雨径流过程单位线模型, 共同构成城市屋顶降雨径流过程的单位线模型, 并建立了统一的数学方程表达形式, 参数包括响应速率与径流(产流)起始时间。其中, 对于不透水与绿色屋顶, 模型响应速率参数分别为坡面汇流时间的倒数与基质土壤层稳渗时间的倒数。根据不透水与绿色屋顶降雨径流过程实际监测数据, 分别采用单位线模型进行了模拟, 取得了良好的模拟效果。模型参数比较分析表明, 绿色屋顶降雨径流削减效应主要依赖于基质土壤层的雨水蓄存作用, 增大基质土壤层厚度可以增大雨水渗蓄量, 并有效削减径流前期峰值, 但对后期峰值的削减效应有所减弱, 并会延长表面积水的排水时间。

关键词: 不透水屋顶; 绿色屋顶; 降雨径流过程; 单位线; 模型; 参数

中图分类号: TV124; TU992

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20200328

1 研究背景

城市屋顶是城市地表中一种重要的类型单元, 按透水性质总体可以划分为不透水屋顶与绿色(渗透)屋顶。单位线法作为一种重要的概念性水文模型, 较早就应用于城市地表(包括不透水屋顶)降雨径流过程的模拟^[1-2], 径流输出对降雨输入的函数响应关系明确。不过, 对于绿色屋顶降雨径流过程的模拟, 现今单位线法尚少有涉及。如今, 对于绿色屋顶降雨径流过程的模拟, 主要基于描述土壤水下渗的 Richards 方程进行数值模拟, 相关模型有 Hydrus-1D、SWMM-2D 等^[3-5], 涉及参数较多, 求解过程复杂, 难以直观反映出径流结果和降雨条件之间的响应关系。

鉴于 Richards 方程的复杂性, 不少学者提出了不同的简化方程^[6-8], 但这些方程均以假设下渗土柱为半无限长作为定解条件, 并多忽略下渗土柱表面积水变化的影响, 主要关注土柱内土壤水长时间的下渗过程。然而现实中绿色屋顶用于雨水渗蓄的基质土壤层的厚度是有限的^[9-10]。如果降雨强度比较小, 绿色屋顶在有限厚度的基质土壤层达到饱和前不会产生径流, 基质土壤层达到饱和后的渗流经排水层排出的过程即为径流过程, 且该径流(渗流)过程更易受到基质土壤层表面降雨(积水)过程变化的影响。因此, 基于绿色屋顶基质土壤层厚度有限性的特点, 结合土壤下渗简化模型, 考虑表面降雨(积水)过程变化对径流(渗流至排水层出流)过程的影响, 能否建立反映降雨-径流响应关系的单位线模型, 就成为一个有待研究的问题。通过建立绿色屋顶降雨径流过程的单位线模型, 再联

收稿日期: 2020-05-11; 网络首发时间: 2020-10-26

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20201026.1118.001.html>

基金项目: 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室开放基金项目(HYD20190F02); 国家科技重大科技专项课题

(2013ZX07304-001)

作者简介: 申红彬(1981-), 博士, 讲师, 主要从事水文学、河流动力学研究。E-mail: hongbinshen 2012@163.com

合不透水层顶降雨径流过程的单位线模型，两者将可共同构成城市屋顶降雨径流过程的单位线模型。并且，在同类模型的基础上，通过比较绿色屋顶与不透水屋顶模型参数的区别，更便于从本质上认识两类屋顶降雨径流过程的差别。

本文基于土壤水饱和和下渗理论，针对绿色屋顶降雨产(径)流特点，推导建立绿色屋顶降雨径流过程的单位线模型，并联合不透水层顶降雨径流过程的单位线模型，共同构成城市屋顶降雨径流过程的单位线模型；再根据不透水屋顶与绿色屋顶降雨径流过程实测资料，分别进行了模拟应用，并在同类模型的基础上，对两类屋顶降雨径流过程模拟中的模型参数进行了比较与分析。

2 模型构建

2.1 不透水屋顶降雨径流过程的单位线模型 城市不透水屋顶一般汇水面积较小，降雨径流过程可选用单一线性水库的 Nash 单位线模型。Nash 瞬时单位线数学表达式通常表示为：

$$u(0, t) = \frac{1}{K} e^{-t/K} \quad (1)$$

式中： $u(0, t)$ 为瞬时单位线； t 为时间； K 为线性水库调蓄参数。

对瞬时单位线通过 S 积分变换，可转换为离散时段单位线形式为：

$$q(\Delta t, n) = \left(e^{-\Delta t/K} \right)^{n-1} \left(1 - e^{-\Delta t/K} \right) \quad (2)$$

式中： $q(\Delta t, n)$ 为时段单位线； Δt 为单位线时段； n 为时段序号。

相应出口断面流量过程为：

$$Q(n) = \sum_{i=1}^n [I(i)q(\Delta t, n-i+1)] \quad (3)$$

式中： $Q(n)$ 为出口断面流量，转化为单位时间径流深(流量与汇水面积相除)单位，mm/min； n 为出流时刻； i 为计算时段序号； $I(i)$ 为净雨强度，mm/min。

式(1)中线性水库调蓄参数 K 等于屋顶坡面汇流时间 τ ：

$$K = \tau = \frac{L}{V} \quad (4)$$

式中： τ 为坡面汇流时间，s； L 为坡面长度，m； V 为坡面水流平均流速，m/s。

研究表明，坡面水流平均流速 V 影响因素较多，包括坡度、糙率、雨强等，影响机理十分复杂，近似可以采用 Eagleson-Bra 公式进行估算^[11]：

$$V = 0.665 \frac{J^{0.3} I^{0.4} A^{0.4}}{n^{0.6} B^{0.4}} \quad (5)$$

式中： J 为坡面比降； n 为糙率； A 为坡面面积，km²； B 为坡宽，m； I 为降雨强度，cm/h。

2.2 绿色屋顶降雨径流过程的单位线模型 根据土壤水饱和和下渗理论，下渗土柱上的作用合力包括：表面积水深、下渗土柱长度、湿润锋处毛管上升高度以及空气剩余压力。假设绿色屋顶基质土壤层厚度为 l ，在基质土壤层饱和产流后，重点考虑表面积水深影响，忽略湿润锋处毛管上升高度及空气剩余压力项，则下渗速率可以根据 Darcy 定律表示为式(6)形式，并经排水层排出转化为径流过程：

$$f_p(t-t_0) = Q(t-t_0) = K_s \frac{h_p(t-t_0) + l}{l} = \frac{K_s}{l} [h_p(t-t_0) + l] = K_d H(t-t_0) \quad (6)$$

式中： $f_p(t-t_0)$ 为产流后土壤下渗速率，mm/min； $Q(t-t_0)$ 为排水层出流速率，转换为单位时间径流深单位，mm/min； $h_p(t-t_0)$ 为表面积水深，mm； l 为基质土壤层厚度，mm； $H(t-t_0)$ 为作用水头，mm； K_s 为饱和水力传导度，mm/min； K_d 为系数，min⁻¹； t 为时间，min； t_0 为饱和产流时间，min。

对于作用水头 $H(t-t_0)$ ，根据质量守恒原理存在如下平衡方程：

$$I(t-t_0) - Q(t-t_0) = \frac{dH(t-t_0)}{dt} \quad (7)$$

式中： $I(t-t_0)$ 为饱和后产流后降雨强度，mm/min。

联合求解式(6)和式(7)，可以得到绿色屋顶产流后径流过程的连续卷积形式：

$$Q(t-t_0)=\int_0^t u(0,t-(\tau-t_0))I(\tau-t_0)d\tau \tag{8}$$

其中瞬时单位线 $u(0,t)$ 的表达式为：

$$u(0,t)=K_d e^{-K_d t} \tag{9}$$

流量过程表示为离散形式为：

$$Q(n-i_0)=\sum_{i=i_0}^n \left\{ I(i)q[\Delta t,n-(i_0-1)] \right\} \tag{10}$$

式中 i_0 为产流开始时段序号。

2.3 两类屋顶降雨径流单位线模型方程统一形式 综合以上，分别建立了城市不透水屋顶降雨径流过程的单位线模型与绿色屋顶降雨径流过程的单位线模型，两者共同构成了城市屋顶降雨径流过程模拟的单位线模型。进一步比较不透水屋顶与绿色屋顶降雨径流过程及相应单位线模型式(3)和式(10)，两类屋顶虽然降雨径流过程形成机理不同，但模型描述使用的数学方法种类相同，因此可以将城市屋顶降雨径流过程单位线模型方程表示成更为统一的数学表达形式，不同之处在于两类屋顶的模型参数计算方法与物理意义有所不同，具体结果如表1所示。可以看出，单位线模型方程经过统一数学表达形式后主要包括两个参数：径流输出对降雨输入的响应速率 β 与径流(产流)起始时段序号 i_0 ，并且对于不透水屋顶与绿色屋顶的模型参数选择不同：(1)在不透水屋顶中响应速率 β 是坡面汇流时间(坡长除以坡面平均流速)的倒数，径流损失主要为填洼损失，产流时间较短，相应 i_0 等于或略大于1；(2)在绿色屋顶中响应速率 β 则是基质土壤层稳渗时间(基质土壤层厚度除以饱和水力传导度)的倒数，并且只有在基质土壤层达到饱和后才会产生径流，产流时间较长，相应 i_0 多大于1。

表1 不同类型屋顶降雨径流单位线模型统一形式与参数比较

单位线类型	方程统一形式	模型参数比较			
		不透水屋顶	参数物理意义	绿色屋顶	参数物理意义
瞬时单位线	$u(0,t)=\beta e^{-\beta t}$				
时段单位线	$q(\Delta t,n)=(e^{-\beta \Delta t})^{n-1}(1-e^{-\beta \Delta t})$	$\beta=1/K=1/\tau$	K 为线性水库调蓄参数，等于坡面汇流时间 τ 。	$\beta=K_d=K_v/l$	K_v 为基质土壤层饱和水力传导度； l 为基质土壤层厚度。
流量离散过程	式(10)	i_0 等于或略大于1	屋顶填洼损失后产流，历时较短。	i_0 大于1	基质土壤层饱和后产流，历时较长。

3 模型应用

3.1 城市不同类型屋顶降雨径流过程监测 2015年6—9月期间，在北京市水科学技术研究院内开展多种类型屋顶降雨径流现场试验监测，位置与布置如图1(a)所示。其中，监测不透水平面屋顶面积约为96 m²，屋顶铺设防水油毛毡；绿色屋顶(绿化比例为100%)面积约为65 m²，垂向结构可参见图1(b)，具体设计如下：(1)植被层草种选择佛甲草，具有抗旱节水、隔热降温、易于管理等特点；(2)基质层采用草炭土、蛭石和砂土混合而成的填料，厚度为6 cm，配比为4:2:1，具有重量轻、透水性好、持水性好、性能稳定、养护方便等特点；(3)过滤层位于基质层底部，材料为过滤布(厚度1~2 cm)，防止介质流失；(4)排水层厚5 cm，用轻质塑料制成，均匀布置碗状结构以承载径流，并有排水出口。试验过程中，屋顶降雨过程监测主要通过屋顶安装雨量计，可以获得1 min和5 min雨量值；径流过程监测采用“液位计+三角堰”测量方法，可以对水位及流量进行连续监测。各个试验屋顶排水管出口下方均配有一套三角堰测流槽装置(参见图1(c))，槽内安装液位计，液位计选用美国生产的Global Water WL-16压力液位计，恒温条件下测量精度为±0.1%满量程，三角堰顶角角度为

30°，平面屋顶三角堰堰底面积为 0.48 m²，绿色屋顶三角堰堰底面积为 0.4 m²。三角堰流量计算在溢流前为时段始末水位差值与堰底面积的乘积，溢流后过堰流量采用 Kindsvater–Shen 公式计算^[12]：

$$Q_{\text{堰}}(t)=C_D\frac{8}{15}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\sqrt{2g}H_e^{5/2}\tag{11}$$

式中： $Q_{\text{堰}}(t)$ 为三角堰过堰出流流量，m³/s； θ 为三角堰顶角，30°； C_D 为流量系数，取值为 0.6； H_e 为堰上水头，m； g 为重力加速度，m/s²。

监测期间，共计监测到 11 场有效降雨径流数据，具体统计如表 2 所示。表 2 中，不透水屋顶填洼损失与绿色屋顶截留深(包括：植物截留、基质渗持、植物蒸散发、基质蒸发量)^[13–16]损失主要根据水量平衡原理，采用降雨量与径流深的差值计算。其中，不透水屋顶填洼损失综合受到前期降雨填洼深、间隔干旱天数、场次降雨量等因素的影响，绿色屋顶截留损失综合受到前期降雨截留深、间隔干旱天数、场次降雨量、植被生长状况等因素的影响。将不同场次降雨量按从小到大排序分别绘制不透水屋顶填洼深与绿色屋顶截留深随降雨量的变化过程(参见图 2 和图 3)，可以发现：绿色屋顶最大截留深基本稳定在 28 mm 左右；不透水屋顶最大填洼深约为 13 mm，相对较大可能是因为屋顶建成时间较长表面坑洼不平、且靠边原建有一道隔墙挡水所致(参见图 1)。对于不透水屋顶某场次降雨，当前期注蓄水量为 0 时，填洼深随降雨量的变化过程近似可按 Linsley 公式计算：

$$\Delta=\Delta_{\text{max}}\left(1-e^{-kP}\right)\tag{12}$$

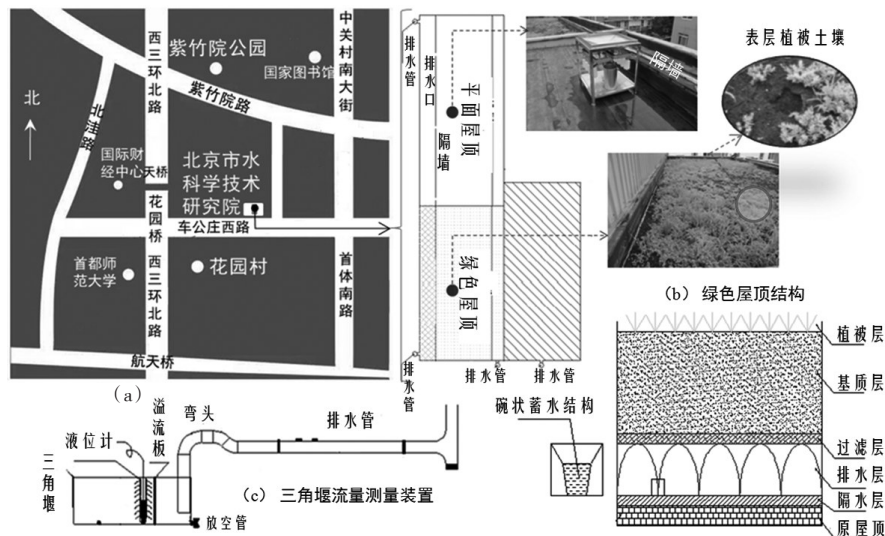


图 1 监测屋顶布置示意

表 2 不透水与绿色屋顶降雨径流监测

序列	时间	降雨量/mm	不透水屋顶		绿色屋顶	
			径流深/mm	填洼深/mm	径流深/mm	截留深/mm
1	2015/6/26 01:50—06:35	33.3	22.31	10.99	5.00	28.31
2	2015/6/26 20:30—21:35	33.5	25.46	8.04	16.75	16.75
3	2015/6/29 13:15—15:35	8.3	1.41	6.89	0.25	8.05
4	2015/6/30 06:05—10:00	1.5	0.17	1.34	0.11	1.40
5	2015/7/22 19:45—21:05	6.7	0.87	5.83	0.07	6.63
6	2015/7/27 20:00—7/28 00:40	54.8	38.91	15.89	25.21	29.59
7	2015/7/28 07:15—08:45	1.2	0.31	0.89	0.30	0.90
8	2015/8/1 21:50—22:55	9.7	1.75	7.95	1.07	8.63
9	2015/8/2 01:15—08:15	1.8	0.29	1.51	0.07	1.73
10	2015/8/7 19:00—20:40	52.0	40.56	11.44	23.92	28.08
11	2015/9/4 10:25—09/05 13:35	61.4	47.28	14.12	35.61	25.79

式中： Δ 为不透水屋顶填注深损失，mm； $\Delta_{\max}$ 为不透水屋顶最大填注深损失，mm； k 为变化速率， $k=1/\Delta_{\max}$ ； P 为降雨量，mm。

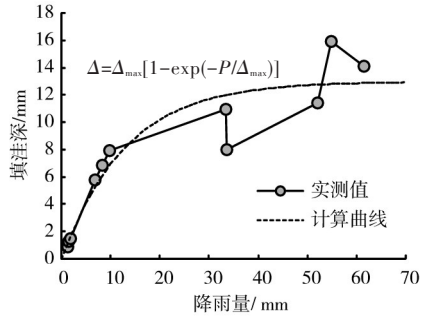


图2 不透水屋顶填注损失变化情况

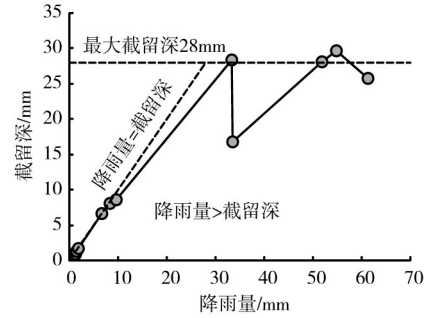


图3 绿色屋顶截留损失变化情况

3.2 屋顶降雨径流过程模拟应用 基于表1中建立的城市屋顶降雨径流过程单位线模型方程统一形式，分别对不透水平面屋顶与绿色屋顶降雨径流过程进行模拟应用。

为便于确定模型径流(产流)起始时间，本次模拟主要对前期干旱天数较长(≥ 5 d)，且降雨量大于绿色屋顶最大截留深(28 mm)的场次降雨径流过程进行模拟，以尽量保证不透水屋顶前期填注蓄水量足以减少至0，绿色屋顶截留深可以达到最大值。因此，选择降雨序列1(2015/6/26 01:50—06:35)、降雨序列6(2015/7/27 20:00—7/28 00:40)以及降雨序列10(2015/8/7 19:00—20:40)进行模拟，相应不透水屋顶实测填注深均在10 mm以上、绿色屋顶实测截留深均在28 mm左右(参见表2)。

基于表1，对不同类型屋顶模型参数分别确定如下：(1)不透水平面屋顶。响应速率参数 β ：不透水平面屋顶模型响应速率 β 主要与屋顶调蓄参数 K 有关。对于不透水平面屋顶调蓄参数 K 值，相当于屋顶汇流时间，基于式(5)计算坡面水流平均流速，根据相关屋顶排水设计规范，坡度取值为2%，降雨强度采用平均雨强，糙率综合考虑屋顶材料、隔墙挡水及排水口缩窄局部阻力影响，取等效糙率为0.17，采用式(4)计算汇流时间。径流(产流)起始时段序号 i_0 ：对于不透水平面屋顶径流(产流)起始时间，可以通过比较累计降雨量与填注损失量确定，对于本次模拟工况，填注损失采用式(12)计算，经检验计算结果与实测径流(产流)起始时间基本符合(参见图4)。(2)绿色屋顶。响应速率参数 β ：绿色屋顶模型响应速率 β 主要与响应参数 K_d 有关。对于绿色屋顶响应参数 K_d 值，经过率定取值为0.2，对应饱和水力传导度 K_s 值为12 mm/min，数值较大可能是因基质层土壤内混合含有砂土有关。径流(产流)起始时段序号 i_0 ：对于不同场次降雨绿色屋顶径流(产流)起始时间，因基质土壤层初始含水率(综合受到前期降雨截留深、间隔干旱天数、植被生长状况等因素影响)不同而会有所区别，需要参考表2中不同场次降雨实测截留深与累计降雨量比较确定。对于本次模拟工况，可以根据场次降雨累计降雨量与最大截留深(28 mm)比较确定，经检验计算结果与实测径流(产流)起始时间基本符合(参见图5)。

为检验模型模拟效果，选用2种评价指标^[17-19]：(1)确定性系数 R^2 。回归分析是模型效果评价最为基本的定量分析方法，利用Excel软件对流量计算值与实测值进行线性回归，可以直接得到回归方程的确定性系数 R^2 值。 R^2 值越趋近于1，说明流量模拟值与实测值拟合越好；(2)Nash-Sutcliffe效率系数(NSE)。NSE效率系数主要用于水文模型效率评价，是判定残差与实测值数据方差相对量的标准化统计值。NSE值一般在 $-\infty \sim 1$ 之间，当 $NSE=1$ 时说明流量计算值与实测值完全吻合，当 $0 < NSE < 1$ 时说明计算效果在可接受水平内，当 $NSE \leq 0$ 时说明流量计算值与实测值存在较大偏差。NSE效率系数计算表达式为：

$$NSE = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_c^i - Q_o^i)^2}{\sum_{i=1}^n \left(Q_o^i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_o^i \right)^2} \right) \quad (13)$$

式中：NSE为Nash-Sutcliffe效率系数； Q_o^i 为流量实测值，mm/min； Q_c^i 为流量模拟值，mm/min。

以降雨序列1(2015/6/26 01:50—06:35)、6(2015/7/27 20:00—7/28 00:40)、10(2015/8/7 19:00—20:40)为例，分别对不透水平面与绿色屋顶降雨径流过程进行模拟，如图4和图5所示。图中纵坐标

值是在式(10)基础上,两侧同乘 $\Delta t(5\text{ min})$,转化为时段降雨量、径流深。可以看出,计算值与实测值变化趋势符合。综合所有降雨径流计算值与实测值,确定性系数 R^2 与NSE效率系数值分别达到0.89、0.89(不透水屋顶)和0.84、0.85(绿色屋顶),模拟效果良好。

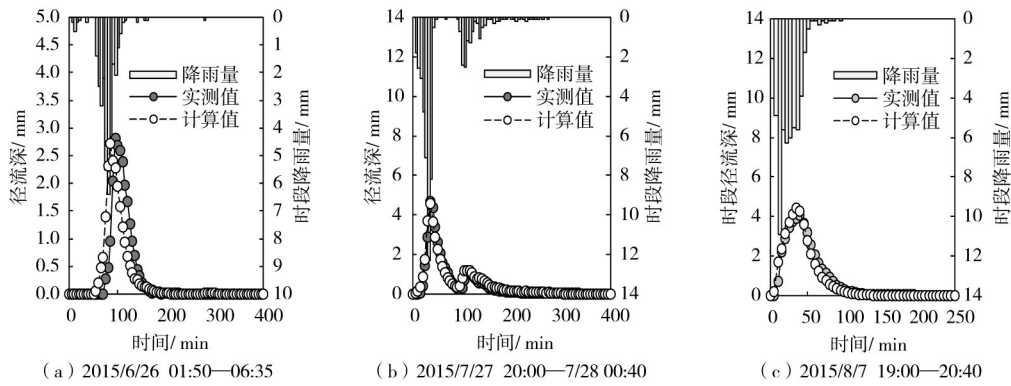


图4 不透水屋顶降雨径流过程模拟

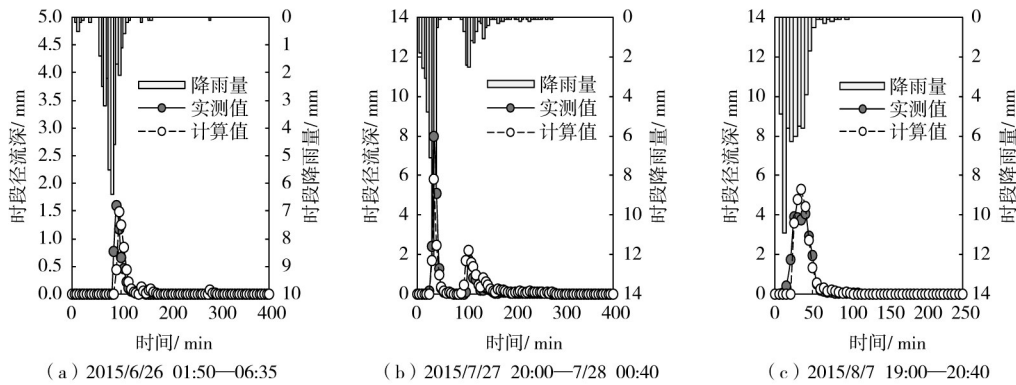


图5 绿色屋顶降雨径流过程模拟

3.3 不同屋顶模型参数比较分析 基于表1中城市屋顶降雨径流过程单位线模型方程的统一形式,比较模拟工况下不透水平面屋顶与绿色屋顶在降雨径流过程模拟中的模型参数取值变化情况,如表3所示。可以看出:不同类型屋顶模型响应速率 β 与径流(产流)起始时间 i_0 参数取值均存在较大区别。对于不透水平面屋顶,径流(产流)起始时间 i_0 基本为1或2,响应速率 β 值为0.05与0.06,对于绿色屋顶,径流(产流)起始时间 i_0 在5~18之间,响应速率 β 值为0.2。绿色屋顶的径流(产流)起始时间明显晚于不透水平面屋顶,说明绿色屋顶具有更强的雨水蓄存能力,但绿色屋顶模型响应速率参数大于不透水平面屋顶,说明不透水平面屋顶经隔墙阻水调节作用后,对降雨输入过程具有更好的调峰削减效果。如果降雨峰值时间位于绿色屋顶饱和和产流时间之后(2015/7/27 20:00—7/28 00:40),则绿色屋顶相比不透水屋顶将难以产生较好的调峰削减效果,见图6(a)。因此,绿色屋顶对降雨径流过程的削减效应更多依赖于基质土壤层对前期降雨的截留(渗蓄)减水作用。

根据表1,绿色屋顶的模型响应速率 β 与基质土壤层厚度 l 和饱和水力传导度 K_s 有关。对绿色屋顶模型 β 值拟定不同的参数调整方案:(1) K_s 一定、调整 l , (2) l 一定、调整 K_s ,参见表3。以降雨序列6(2015/7/27 20:00—7/28 00:40)为例,该降雨过程为双峰雨型,模拟计算不同的 β 值条件下绿色屋顶的降雨径流过程,如图6(b)(c)所示。计算过程中,假设绿色屋顶最大截留深与基质土壤层厚度 l 成正比,对图6(b)(c)比较可知,在绿色屋顶饱和和水力传导度 K_s 一定情况下,增大基质土壤层厚度 l 更能有效增大前期雨水渗蓄量,并可显著削减径流过程前期峰值,不过对后期峰值的削减效应有所减弱。另外,从理论分析来看,增大基质土壤层厚度 l (或减小饱和水力传导度 K_s)可使模型响应速率参数 β 值减小,这会导致后期表面积水排水时间略有延长(参见图6(b)(c)局部)。因此,对于增大绿色屋顶基质土壤层厚度 l 的设计要综合考虑前期渗蓄雨量增多与后期排水时间延长的影响。

表3 不透水与绿色屋顶模型参数与调整方案

序列	时间	不透水屋顶		绿色屋顶		绿色屋顶参数 β 调整方案	
		β	i_0	β	i_0	K_s 一定, 调整 l	l 一定, 调整 K_s
1	2015/6/26 01:50—06:35	0.06	2	0.2	18	$K_s=12\text{mm/min}$, $l=60、80、40\text{mm}$	$K_s=12、6、18\text{mm/min}$
6	2015/7/27 20:00—7/28 00:40	0.05	1	0.2	6		
10	2015/8/7 19:00—20:40	0.06	1	0.2	5		

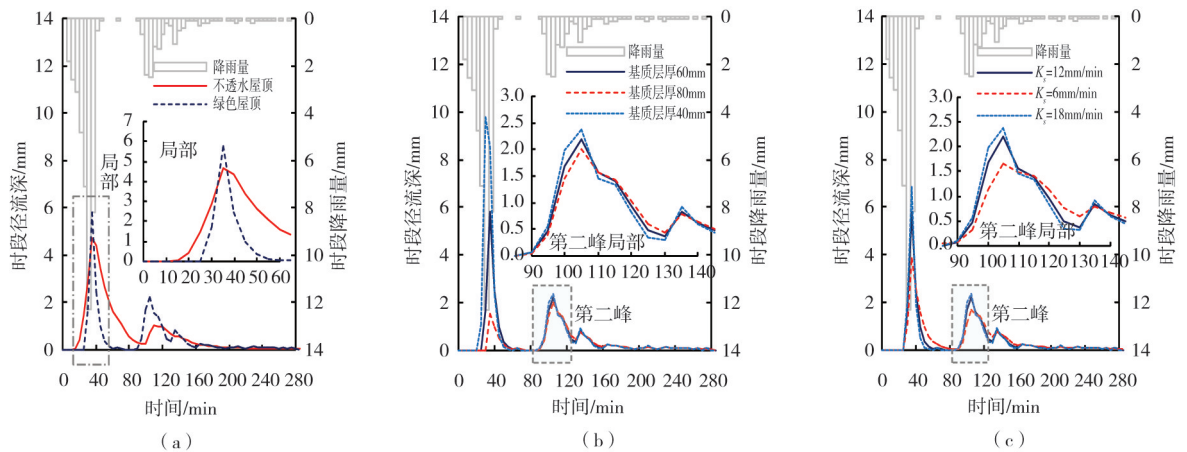


图6 不同参数方案下屋顶降雨径流过程模拟

需要指出的是, 上述不同屋顶模型参数比较分析主要针对本次监测屋顶的模拟工况, 前期干旱天数较长、场次降雨量较大, 不透水屋顶填洼损失与绿色屋顶截留损失均基本达到最大值。实际上, 对于不同场次降雨, 两类屋顶径流损失的影响因素众多、变化规律复杂, 这会直接影响模型径流(产流)起始时间参数的取值。需在进一步完善研究不透水屋顶与绿色屋顶径流损失规律的基础上, 再通过与累计降雨量比较确定模型径流(产流)起始时间参数。对于模型响应速率参数, 根据表1中参数物理意义, 不透水屋顶在不同降雨强度、屋顶坡度、阻力特性等条件下需要分别加以确定, 绿色屋顶则在不同基质层厚度及材料组成等条件下需要分别加以确定。

4 结论

根据本文的模拟计算与分析, 可以得到以下几点结论: (1)城市不透水与绿色(渗透)屋顶的降雨径流过程均可采用单位线模型进行模拟, 并可采用统一的数学方程形式表示, 参数包括响应速率参数与径流起始时间。对于不同类型屋顶, 模型参数计算方法与物理意义有所不同。其中, 不透水屋顶的响应速率参数为坡面汇流时间的倒数, 绿色屋顶的响应速率参数则为基质土壤层稳渗时间的倒数。(2)结合城市不透水平面屋顶与绿色屋顶降雨径流过程的实际监测数据, 选择模拟工况, 采用单位线模型分别对两类屋顶的降雨径流过程进行模拟, 并选用确定性系数 R^2 与 NSE 效率系数对模拟效果进行评价。结果表明, 计算值与实测值变化趋势符合良好, 确定性系数 R^2 与 NSE 效率系数值分别达到0.89、0.89(不透水屋顶)和0.84、0.85(绿色屋顶), 初步验证了所建模型的合理性。(3)对绿色屋顶拟定不同的响应速率参数调整方案计算结果表明, 在饱和水力传导度一定情况下, 增大基质土壤层厚度能够有效增大前期雨水渗蓄量, 并可显著削减径流过程前期峰值, 但对后期峰值削减效应有所减弱, 且会导致表面积水排水时间略有延长。因此, 对绿色屋顶增大基质土壤层厚度要综合考虑前期渗蓄雨量增多与后期排水时间延长的影响。

后期, 考虑到不透水屋顶与绿色屋顶径流损失影响因素众多、变化规律复杂, 仍需在进一步完善研究两类屋顶径流损失规律的基础上, 通过与累计降雨量比较确定模型径流(产流)起始时间参

数,并对不同条件下的不透水屋顶(不同降雨强度、屋顶坡度、阻力特性等)与绿色屋顶(不同基质屋顶厚度及材料组成等),分别研究确定模型响应速率参数。对于城市地表而言,下垫面种类较多,除屋顶(不透水屋顶、绿色屋顶)外,还包括道路(不透水路、透水铺装等)、绿地、水域等,不同种类下垫面的产汇流规律有所不同。因此,在城市降雨径流模拟中,应根据详细的土地利用和土壤属性分布数据,考虑降雨特征的时空变异性,分别采用与下垫面特征相匹配的产汇流理论,划分水文单元进行分布模拟^[20]。本文所建模型为屋顶单元类子模型,可以再结合其它地表单元类子模型,共同构建城市地表降雨径流的分布式模型。

参 考 文 献:

- [1] KIDD C H . Rainfall-runoff processes over urban surfaces[C]//Proceedings of an international workshop . Wallingford: United Kingdom, 1978 .
- [2] 任伯帆,邓仁建.城市地表雨水汇流特性及计算方法分析[J].中国给水排水,2006,22(14):39-42.
- [3] HILTEN R N, LAWRENCE T M, TOLLNER E W . Modeling stormwater runoff from green roofs with Hydrus-1D [J]. Journal of Hydrology, 2008, 358(3/4): 288-293 .
- [4] 唐莉华,倪广恒,刘茂峰,等.绿化屋顶的产流规律及雨水滞蓄效果模拟研究[J].水文,2011,31(4):18-22.
- [5] PALLA A, GNECCO I, LANZA L G . Compared performance of a conceptual and a mechanistic hydrologic models of a green roof[J]. Hydrological Processes, 2012, 26(1): 73-84 .
- [6] 王全九,来剑斌,李毅. Green-Ampt 模型与 Philip 入渗模型的对比分析[J].农业工程学报,2002,18(2):13-16.
- [7] 甘永德,贾仰文,仇亚琴,等.降雨条件下分层土壤入渗特性[J].水土保持学报,2012,26(5):217-223.
- [8] 王春颖,毛晓敏,赵兵.层状夹砂土柱室内积水入渗试验及模拟[J].农业工程学报,2010,26(11):61-67.
- [9] 卢浩,康成,谭松明,等.屋顶绿化基质对雨水径流水质的影响[J].中国给水排水,2016,32(7):135-138.
- [10] 秦华鹏,唐女,唐巧玲.蓄水层对绿色屋顶径流削减能力的影响分析[J].中国给水排水,2016,32(13):132-135.
- [11] 谢华,都金康,胡裕军,等.基于汇流时间方法的空间分布式水文模型研究[J].武汉理工大学学报,2005,27(12):75-78.
- [12] 吴长文,王礼先.小集水区试验中三角堰量水问题的研究[J].北京林业大学学报,1993,15(3):66-74.
- [13] ZHANG S H, GUO Y P . Analytical probabilistic model for evaluating the hydrologic performance of green roofs [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18(1): 19-28 .
- [14] WOLF D, LUNDHOLM J T . Water uptake in green roof microcosms: effects of plant species and water availability [J]. Ecological Engineering, 2008, 33(2): 179-186 .
- [15] TEEMUSK A, MANDER U . Rainwater runoff quantity and quality performance from a green roof: the effects of short-term events[J]. Ecological Engineering, 2007, 30(3): 271-277 .
- [16] 葛德,张守红.不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响[J].环境科学,2018,39(11):5015-5023.
- [17] 胡胜,曹明明,邱海军,等.CFSR 气象数据在流域水文模拟中的适用性评价-以灞河流域为例[J].地理学报,2016,71(9):1571-1586.
- [18] NASH J E, SUTCLIFFE J V . River flow forecasting through conceptual models (Part 1): A discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290 .
- [19] GUPTA H V, SOROOSHIAN S, YAPO P O . Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 1999, 4(2): 135-143 .
- [20] 徐宗学,程涛.城市水管理与海绵城市建设之理论基础—城市水文学研究进展[J].水利学报,2019,50(1):53-61.

(下转第 348 页)

Lateral distribution of the average water depth of the typical compound cross-section channel under ice cover

ZOU Dehao^{1, 2, 3}, DAI Changlei^{1, 2}, GUO Xianfeng^{1, 2}, LU Jinzhi³

(1. *Institute of Water Conservancy and Electric Power, Heilongjiang University, Harbin 150080, China;*

2. *School of Hydraulic & Electric-power, Heilongjiang University, Harbin 150080, China;*

3. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)*

Abstract: The study of the horizontal distribution law of the depth averaged velocity of ice-coated rivers with typical compound sections is of great significance for flood control and management. Based on the SKM method, current study incorporated the double-layer hypothesis theory and introduced secondary flow term into the Reynolds shear stress to build a quasi-two-dimensional model. This model takes into account the effects of river bed friction, ice sheet resistance, lateral shear turbulence and secondary flow. Compared with the experimental results of the corresponding physical model, the proposed quasi-two-dimensional mathematical model can reasonably predict the horizontal distribution of the depth averaged velocity and river flow rate in each compound section. The mathematical model is able to capture characteristics of horizontal distribution of the depth averaged velocity without solving complex equations simultaneously by computer programming. This will provide significant guidance for the study of water flow characteristics of ice-coated river channels with multiple sections.

Keywords: ice cover; complex section; velocity distribution; quasi-two-dimensional model

(责任编辑: 李福田)

(上接第 340 页)

Study on unit hydrograph model for rainfall-runoff simulation of urban roofs

SHEN Hongbin^{1, 2}, XU Zongxue³, LI Lingjun⁴, HAO Xiuping¹

(1. *North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;*

2. *Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing Engineering Research Center*

for Non-Conventional Water Resources Utilization and Water Saving, Beijing 100048, China;

3. *College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China;* 4. *Bureau of Comprehensive Development, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)*

Abstract: According to the permeability characteristics, urban roofs can be divided into two types, impermeable roof and green roof. For the rainfall-runoff process on green roof, a unit hydrograph model was proposed based on the saturated infiltration theory, where the thickness limitation of substrate material layer and the influence of accumulated surface-water are considered. Meanwhile, Nash unit hydrograph model for rainfall-runoff process on impermeable roof is introduced. Then, a unified unit hydrograph model for rainfall-runoff simulation on different urban roof types was developed, in which there are two parameters, response rate and runoff generating time. For impermeable roof, model response rate is the reciprocal of concentration flow time. For green roof, model response rate is the reciprocal of stable infiltration time. Using the proposed unit hydrograph model, rainfall-runoff processes on impermeable roof and green roof are simulated. The results show that the estimated and measured values are consistent well. Comparison and analysis on model parameters for different urban roof types show that the rainwater storage capacity of substrate material layer plays an important role for the rainfall-runoff reduction effects of green roof. With the increase of substrate material layer thickness, both the rainwater storage capacity and the first peak-flow reduction effect will increase, but later the peak-flow reduction effect will decrease, and the drainage time of accumulated surface-water will be extended.

Keywords: impermeable roof; green roof; rainfall-runoff process; unit hydrograph; model; parameters

(责任编辑: 韩 昆)