

# 不同入渗模型对 LID 措施效能评价的影响研究

葛有成<sup>1</sup>, 唐双成<sup>1</sup>, 单正清<sup>1</sup>, 许青<sup>1</sup>, 赵文宇<sup>1</sup>, 陈锋<sup>2</sup>

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏扬州 225009; 2. 南通市通州区金沙街道水利站, 江苏南通 226300)

**摘要:** 为研究不同入渗模型对 LID 措施效能评价的影响, 采用 MATLAB 编程, 研究稳定入渗模型、Green-Ampt 入渗模型和 Horton 入渗模型对 LID 措施效能模拟的差别和各自的适用条件。研究表明: LID 措施汇流面积比为 10:1、表层蓄水深度为 10 cm 时, 对入渗率模拟, Green-Ampt 模型的计算精度高于 Horton 模型; 对溢流发生时间模拟, 随着降雨历时的延长、雨强的增大以及土壤前期含水率的升高, 不同入渗模型对溢流发生时间计算的差别逐渐缩小; 对滞蓄总量模拟, Green-Ampt 模型与干燥条件下拟合的 Horton 模型的计算结果相对差值在 5.4% 之内, 但使用湿润条件下拟合的 Horton 模型与其他模型的计算结果差值随降雨历时的延长而增大。Green-Ampt 模型对入渗率计算的精度略高, 但其涉及参数较多, Horton 模型应用较为便捷, 但其拟合计算受土壤含水率影响较大。

**关键词:** 低影响开发 (LID); 稳定入渗; Green-Ampt 模型; Horton 模型

中图分类号: TV213.9; TU992

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)05-0100-07

## Impact of different infiltration models on the performance evaluation of LID measures

GE Youcheng<sup>1</sup>, TANG Shuangcheng<sup>1</sup>, SHAN Zhengqing<sup>1</sup>, XU Qing<sup>1</sup>, ZHAO Wenyu<sup>1</sup>, CHEN Feng<sup>2</sup>

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Water Conservancy Station of Jinsha Street in Tongzhou District, Nantong, Nantong 226300, China)

**Abstract:** To clarify the impact of different infiltration models on the performance evaluation of low impact development (LID) measures, MATLAB programming was used to study the differences and applicable conditions of the constant infiltration model, the Green-Ampt model and the Horton model. Research showed that when the catchment area ratio of the LID measures was 10:1 and the surface storage depth was 10 cm, the calculation accuracy of the infiltration rate of Green-Ampt model was higher than that of the Horton model. In terms of the calculation of overflow time, the difference between different infiltration models gradually decreased with the increase of rainfall duration, rainfall intensity and initial soil moisture contents. In terms of the calculation of runoff storage, the relative difference between the Green-Ampt model and the Horton model fitted under dry conditions was less than 5.4%, but the difference between the Horton model fitted under humid conditions and other models enlarged with the increase of rainfall duration. It is found that the Green-Ampt model has a slightly higher accuracy in the calculation of infiltration rate, but it involves multiple parameters; however the Horton model is more user friendly, but its fitting calculation is greatly affected by the soil moisture content.

**Key words:** low impact development (LID); constant infiltration; Green-Ampt model; Horton model

## 1 研究背景

近年来,随着城市化进程的加快,硬化的不透水下垫面极速扩张,使得地表径流的汇集时间缩短、径

流峰值流量和总量骤增,直接引发了城市洪涝频发和水生态恶化等问题<sup>[1-2]</sup>。而采用单一的径流快速排除模式,通过提高排水管网的设计标准无法彻底地解决城市内涝问题,还转移了本可以补给地下水

收稿日期:2021-01-30; 修回日期:2021-06-21

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK20170504);江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

作者简介:葛有成(1996-),男,江苏常州人,硕士研究生,主要从事城市雨洪管理研究。

通讯作者:唐双成(1987-),男,陕西渭南人,博士,讲师,从事水资源利用与环境保护研究。

的雨水资源,与区域开发前的原有水文机制不相符<sup>[3]</sup>。又因城市雨水径流具有随机性强、分布面广等特点,低影响开发(low impact development, LID)雨水管理理念开始在世界各地逐步地被接受并推广<sup>[4-5]</sup>。LID 理念摒弃以往对径流的快速排除机制,强调通过源头控制、过程管理以及末端调蓄措施维持和保护场地天然的水文功能,有效缓解快速城市化引发的洪涝灾害频发和污染加剧等问题<sup>[6-8]</sup>。2013 年,我国提出建设“自然积存、自然渗透、自然净化”的海绵城市,LID 措施是海绵城市理念的核心源头控制措施<sup>[9-11]</sup>,随着海绵城市建设的推广,国内针对 LID 措施的研究与应用逐步深入。

随着雨水花园、透水铺装<sup>[12-13]</sup>等各种 LID 措施的广泛应用,有关 LID 措施滞蓄入渗能力的研究也不断得以深入。侯精明等<sup>[14]</sup>采用 SWMM(storm water management model)模型内嵌的 Horton 模型模拟了在不同土壤条件下,LID 措施对径流调控效果的影响,结果表明,LID 措施在饱和状态和半饱和状态下的径流削减能力明显小于自然状态下的径流削减能力。唐双成等<sup>[13]</sup>采用平均入渗率来研究雨水花园的滞蓄能力,结果表明,雨水花园在入渗率和设计深度一定时,溢流时间与汇流面积比及雨强有关。石宝山等<sup>[15]</sup>研究了基于 Green-Ampt 和稳定入渗两种不同模型下的城市内涝模拟,结果表明,相对于稳定入渗模型,Green-Ampt 在频率为 1、10、50 a 的降雨条件下,内涝积水分别减少 28.41%、21.04%、15.02%,模型模拟结果受降雨强度影响变化更加明显。随着海绵城市理念的发展与相关研究的愈加深,各种不同入渗模型被广泛地应用于 LID 措施设计和效能评价中。相关规范<sup>[16]</sup>及一些研究对于入渗量的计算常采用稳定入渗模型,基于 SWMM 模型的城市雨洪研究中普遍使用了模型自带的 Horton 入渗模型<sup>[14,17]</sup>,还有学者在城市雨洪的研究中尝试了 Green-Ampt 模型<sup>[15]</sup>。但在 LID 措施设计和效能评价时,不同入渗模型之间的差异性研究还相对较少。

稳定入渗模型和 Horton 模型是经验模型,Green-Ampt 模型是半经验半理论模型,采用不同入渗模型计算 LID 措施的滞蓄效果存在一定差异。本文采用 MATLAB 编程建立 LID 措施的水量平衡计算模型,入渗过程选择稳定入渗模型、Horton 入渗模型和 Green-Ampt 入渗模型并基于扬州市土壤实测数据,对比分析在不同雨强、不同前期土壤含水率情况下该 3 种入渗模型计算 LID 措施滞蓄能力的差

异,并讨论不同入渗模型的特点和适用范围,研究结果可为 LID 措施的精确设计提供参考依据。

## 2 模型建立与评价

### 2.1 模型建立

2.1.1 稳定入渗模型 稳定入渗模型设定一恒定入渗率  $i_s$ ,土壤含水量达到了饱和含水量时,入渗率为最小值,土壤入渗率近似为常数,对应的累积入渗量  $W_s$  计算式如下:

$$W_s = i_s \cdot A \cdot T + H \cdot A \quad (1)$$

式中:  $W_s$  为累积入渗量,  $\text{cm} \cdot \text{m}^2$ ;  $i_s$  为稳定入渗率,  $\text{cm}/\text{min}$ ;  $A$  为 LID 措施面积,  $\text{m}^2$ ;  $t$  为入渗持续时间,  $\text{min}$ ;  $H$  为 LID 措施表层蓄水深度,  $\text{cm}$ 。

2.1.2 Horton 入渗模型 Horton 模型的入渗率由初始入渗率、稳定入渗率和折减系数决定。土壤含水量直接影响其入渗性能,随着降雨历时的延长,深部土体的含水率增大,入渗率逐渐减小,入渗达到稳定<sup>[18]</sup>。Horton 入渗公式依据入渗率随时间变化建立如下经验方程:

$$i_h(t) = i_s + (i_0 - i_s)e^{-\beta t} \quad (2)$$

式中:  $i_h(t)$  为 Horton 模型  $t$  时刻瞬时入渗率,  $\text{cm}/\text{min}$ ;  $i_s$  为稳定入渗率,  $\text{cm}/\text{min}$ ;  $i_0$  为初始入渗率,  $\text{cm}/\text{min}$ ;  $t$  为入渗持续时间,  $\text{min}$ ;  $\beta$  为折减系数。

将公式(2)对时间  $t$  进行积分,得到累积入渗量  $I_h$  的表达式:

$$I_h = \int_0^t i_h(t) dt = i_s t + \frac{i_0 - i_s}{\beta} (1 - e^{-\beta t}) \quad (3)$$

式中:  $I_h$  为 Horton 模型累积入渗量,  $\text{cm} \cdot \text{m}^2$ 。

2.1.3 Green-Ampt 入渗模型 Green-Ampt 入渗模型假设土壤剖面中存在一个很陡的湿润峰面,湿润峰面到土壤表面的土壤为饱和区,饱和区为恒定的饱和含水率  $\theta_s$ ,同时湿润峰处土壤吸力  $S_f$  固定不变;湿润峰之下的土壤为干土区,干土区均为初始土壤含水率  $\theta_0$ <sup>[19-20]</sup>。根据达西定律,可以推导出入渗率为:

$$i_g = K_s \left( 1 + \frac{(\theta_s - \theta_0) S_f}{I} \right) \quad (4)$$

式中:  $i_g$  为 Green-Ampt 模型瞬时入渗率,  $\text{cm}/\text{min}$ ;  $K_s$  为土壤饱和导水率,  $\text{cm}/\text{min}$ ;  $\theta_s$  为土壤饱和含水率;  $\theta_0$  为土壤初始含水率;  $S_f$  为土壤湿润峰平均水吸力,  $\text{cm}$ ;  $I$  为累积入渗量,  $\text{cm} \cdot \text{m}^2$ 。

为解决公式(4)中  $i_g$  只有隐函数解的问题,Philip 于 1985 年提出了大毛管特征长度( $L$ )概念,或者称为临界压力或半吸力长度。张振华等<sup>[21]</sup>利用该概念

推求了 Green - Ampt 模型入渗率显式近似解,利用公式(4)得出入渗率  $i_g$  和入渗量  $I_g$  的表达式:

$$i_g = K_s \left( 1 + \sqrt{\frac{\Delta\theta S_f}{4bK_s t}} \right) \quad (5)$$

$$I_g = 2 \sqrt{bK_s \Delta\theta S_f t} \quad (6)$$

式中:  $\Delta\theta$  为土壤含水率变化量;  $b$  为介于  $0.5 \sim \pi/4$  之间的常数,其值取决于土壤水扩散率函数的形状;  $I_g$  为 Green - Ampt 模型累积入渗量,  $\text{cm} \cdot \text{m}^2$ 。

2.1.4 溢流时间确定 假设为平均雨强条件,则降雨历时内的总入流量为:

$$W_r = \mu \cdot T \cdot R \cdot A(B + 1) \quad (7)$$

式中:  $W_r$  为入流量,  $\text{cm} \cdot \text{m}^2$ ;  $R$  为平均雨强,  $\text{cm}/\text{min}$ ;  $T$  为入流持续时间,  $\text{min}$ ;  $B$  为汇流面积比;  $A$  为 LID 措施

面积,  $\text{m}^2$ ;  $\mu$  为径流系数。

LID 措施面对设计降雨时,正好未发生溢流,此时,入流量  $W_r$  等于总滞蓄水量  $W_x$ ,溢流发生时间点  $t$  等于入流持续时间  $T$ 。求解溢流发生时间点  $t$  对 LID 措施设计以及 LID 措施滞蓄能力评价至关重要。当  $t > T$  时, LID 措施未产生溢流,则有  $W_x = W_r$ 。当  $t < T$  时, LID 措施产生溢流,滞蓄水量为:

$$W_x = I + A \cdot H \quad (8)$$

式中:  $W_x$  为总滞蓄水量,  $\text{cm} \cdot \text{m}^2$ ;  $I$  为累积入渗量,  $\text{cm} \cdot \text{m}^2$ ;  $H$  为 LID 措施的蓄水深,  $\text{cm}$ ;  $A$  为 LID 措施的面积,  $\text{m}^2$ 。

基于以上理论公式,得出不同入渗模型对应的溢流发生时间  $t$  的计算公式,如表 1 所示。

表 1 不同入渗模型的溢流发生时间  $t$  计算公式

| 入渗模型              | 溢流发生时间 $t$ (min)                                                                                                                       |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 稳定入渗模型            | $t_s = \frac{H}{(\mu R(B + 1) - i_s)}$                                                                                                 |
| Horton 入渗模型       | $t_h \mu R(B + 1) = i_s t_h + \frac{(i_0 - i_s)}{\beta} (1 - e^{-\beta t_h}) + H$                                                      |
| Green - Ampt 入渗模型 | $t_g = \frac{(2 \sqrt{bK_s(\theta_s - \theta_0)S_f} + \sqrt{4\mu R(B + 1)H + 4bK_s(\theta_s - \theta_0)S_f})^2}{4\mu^2 R^2 (B + 1)^2}$ |

注:(1)Horton 模型的联立解是复杂的隐函数,用 MATLAB 编程,求解隐函数;(2)  $t_s$ 、 $t_h$ 、 $t_g$  分别为稳定入渗模型、Horton 模型、Green - Ampt 模型的溢流发生时间,  $\text{min}$ 。

## 2.2 模型评价参数

模型的精度是衡量可靠性的重要指标,本文采用相关指数  $R^2$  作为评估模型拟合可靠程度的指标,计算过程中采用平均绝对误差 (mean absolute error, MAE) 和平均相对误差 (relative error, RE) 两个指标将不同模型的入渗率拟合误差量化,作为比较模型之间入渗率误差大小的依据,具体计算公式如下:

(1) 相关指数 ( $R^2$ )。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (9)$$

式中:  $n$  为样本个数;  $\hat{y}_i$  为模拟值;  $y_i$  为实测值;  $\bar{y}$  为实测值均值。

(2) 平均绝对误差 (MAE)。

$$MAE = \frac{\sum |x_i - x|}{n} \quad (10)$$

式中:  $x_i$  为实测值;  $x$  为模拟值;  $n$  为样本个数。

(3) 平均相对误差 (RE)。

$$RE = \frac{\sum \left| \frac{x_i - x}{x_i} \right|}{n} \quad (11)$$

## 3 结果与分析

### 3.1 模型参数拟合

为研究选用不同入渗模型对 LID 措施蓄渗效果计算的影响,依据扬州地区积水入渗实验实测的入渗过程,基于两种不同初始入渗率的干湿条件,使用 MATLAB 软件拟合,确定稳定入渗模型、Horton 入渗模型以及 Green - Ampt 入渗模型在不同土壤含水率状况下的对应计算参数值。干燥条件的初始入渗率为  $0.25 \text{ cm}/\text{min}$ ,湿润条件的初始入渗率为  $0.15 \text{ cm}/\text{min}$ 。

图 1 为扬州地区土壤实测入渗率变化过程。由图 1 可知,入渗率随入渗历时逐渐减小,约  $1 \text{ h}$  后,入渗率稳定在  $0.05 \text{ cm}/\text{min}$  左右,入渗过程进入稳定入渗阶段,因而取稳定入渗率为  $0.05 \text{ cm}/\text{min}$ 。拟合 Horton 和 Green - Ampt 两种模型时,依照干燥、湿润两种条件下的不同初始入渗率分别拟合。

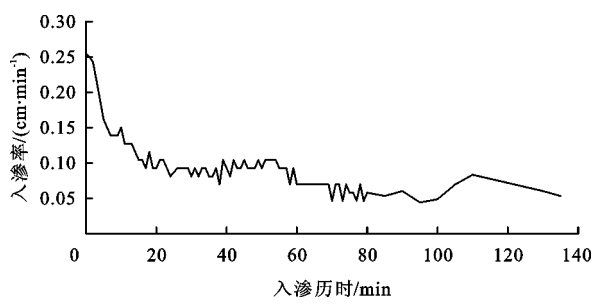


图 1 扬州地区土壤实测入渗率变化过程

在干燥与湿润条件下分别对 Horton 模型和 Green - Ampt 模型进行拟合, 图 2 为该两个模型分别

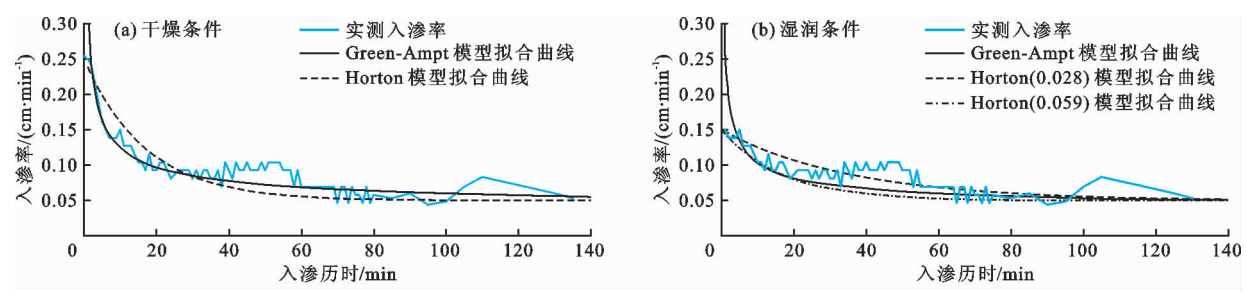


图 2 不同模型在干燥和湿润条件下对入渗率随入渗历时变化过程的拟合结果与实测值比较

图 2(a)为干燥条件的拟合结果,Horton 模型拟合的折减系数 $\beta$ 值为 0.059,拟合曲线的相关指数 $R^2$ 为 0.80,Green - Ampt 模型拟合得出湿润峰平均水吸力 $S_f$ 为 30 cm,土壤饱和导水率 $K_s$ 为 0.03 cm/min,土壤含水率变化量 $\Delta\theta$ 为 0.2,系数 $b$ 为 0.5,拟合曲线的相关指数 $R^2$ 为 0.86。图 2(b)为湿润条件下的拟合结果,湿润条件下 Horton 模型拟合的折减系数 $\beta$ 值为 0.028,拟合曲线的相关指数 $R^2$ 为 0.70,而使用干燥条件下拟合的 $\beta$ 值时,Horton 模型拟合曲线的相关指数 $R^2$ 为 0.66。湿润条件下的 Green - Ampt 模型沿用干燥条件下拟合的湿润峰平均水吸力 $S_f$ ,饱和入渗系数 $K_s$ 等参数值,仅重新拟合相同湿润前期条件下土壤水分变化率 $\Delta\theta$ ,结果为 0.12,拟合曲线的相关指数 $R^2$ 为 0.59。总体上看,Horton 模型和 Green - Ampt 模型的入渗率拟合曲线总体趋势接近,在湿润条件下,Horton(0.028)模型拟合曲线整体位于 Horton(0.059)模型拟合曲线之上(图 2(b)),折减系数 $\beta$ 的减小使模型的入渗率模拟结果整体变大。考虑到实际中入渗过程可能受到多因素的综合影响,以上拟合结果可用于分析后续不同入渗模型对 LID 措施蓄渗性能的影响。

3.2 不同入渗模型对 LID 措施滞蓄效果模拟的差异

通过对比 3 种入渗模型在不同前期条件下的入渗率、溢流发生时间和滞蓄总量,分析并讨论不同入

在干燥和湿润条件下的入渗率随入渗历时变化过程拟合结果与实测值比较。折减系数 $\beta$ 为 Horton 模型中表示入渗率衰减的经验系数,多数研究在应用 Horton 模型时,一般采用土壤自然干燥状态下拟合的 $\beta$ 值,未考虑湿润土壤下拟合的折减系数对模型的影响。本研究中干燥条件下 Horton 模型拟合的折减系数为 0.059,湿润条件下拟合的折减系数为 0.028,因此,将干燥土壤条件拟合 $\beta$ 的 Horton 模型定义为 Horton(0.059)模型,湿润条件下拟合 $\beta$ 的 Horton 模型定义为 Horton(0.028)模型,同时在湿润条件下进行比较分析(图 2(b))。

渗模型对 LID 措施滞蓄效果模拟的差异。湿润条件下,考虑不同土壤含水率拟合的折减系数 $\beta$ 对 Horton 模型的影响,对湿润条件下 $\beta$ 值的 Horton(0.059)模型与干燥条件下 $\beta$ 值的 Horton(0.028)模型的模拟结果分别进行分析。LID 措施的表层蓄水深度取 10 cm;汇流面积比取 10:1;考虑到城市中多为不透水硬化面,径流系数取 0.9。

3.2.1 入渗率 通过计算各入渗模型入渗率模拟值与实测值的平均绝对误差、平均相对误差及相关指数,分析不同入渗模型对 LID 措施入渗率的模拟精度。各入渗模型在干燥和湿润条件下对入渗率模拟值的误差及拟合相关指数如表 2 所示。

表 2 各入渗模型在干燥和湿润条件下对入渗率模拟值的误差及拟合相关指数

| 模型类型            | 干湿条件                  | 平均相<br>对误差<br>$RE / \%$ | 平均绝对<br>误差 $MAE /$<br>$(\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$ | 相关<br>指数<br>$R^2$ |
|-----------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------|
| 稳定入渗模型          | 无                     |                         |                                                           |                   |
|                 | 干燥                    | 33.1                    | 0.019                                                     | 0.80              |
| Horton 模型       | 湿润( $\beta = 0.028$ ) | 14.0                    | 0.012                                                     | 0.70              |
|                 | 湿润( $\beta = 0.059$ ) | 21.0                    | 0.018                                                     | 0.66              |
| Green – Ampt 模型 | 干燥                    | 13.0                    | 0.012                                                     | 0.86              |
|                 | 湿润                    | 18.0                    | 0.017                                                     | 0.59              |

由表 2 可看出,干燥条件下,Green - Ampt 模型

的相关评价参数优于 Horton 模型, Green - Ampt 模型入渗率模拟值的平均相对误差比 Horton 模型小 20.1%, 平均绝对误差比 Horton 模型小 0.007 cm/min; 湿润条件下, Green - Ampt 模入渗率模拟值的平均相对误差及平均绝对误差相对于湿润条件下  $\beta$  值的 Horton (0.059) 模型仍然更小, Horton (0.059) 模型相较于 Green - Ampt 模型, 入渗率模拟值的平均相对误差大 3.0%, 平均绝对误差大 0.001 cm/min。湿润条件下  $\beta$  值的 Horton (0.028) 模型的各项拟合指标相对 Horton (0.059) 模型和 Green - Ampt 模型均更优。相较于干燥条件, 湿润条件下 Green - Ampt 模型的误差略有扩大, 平均相对误差增大了 5.0%, 平均绝对误差增大了 0.005 cm/min。湿润条件下的两种 Horton 模型比干燥条件的误差均有减小, 相较于干燥条件, Horton (0.059) 模型平均相对误

差减小了 12.1%, 平均绝对误差减小了 0.001 cm/min; Horton (0.028) 模型平均相对误差减小了 19.1%, 平均绝对误差减小了 0.007 cm/min。

通过上述比较可知, Green - Ampt 模型在干燥条件下相较于 Horton 模型误差更小, 而湿润条件下 Horton (0.028) 模型的精度略高。相比干燥条件, 湿润条件下 Green - Ampt 模型的计算误差明显增大, 而 Horton 模型的计算误差均有所减小。

3.2.2 溢流发生时间 当 LID 措施表层深度蓄满时, 雨水径流继续入流会发生溢流。图 3 展示了干燥和湿润条件下, 不同入渗模型计算 LID 措施的溢流发生时间随雨强的变化情况, 其中, 图 3 (b) 中对在湿润条件下区分干燥条件下  $\beta$  值的 Horton (0.059) 模型和湿润条件下  $\beta$  值的 Horton (0.028) 模型分别进行分析。

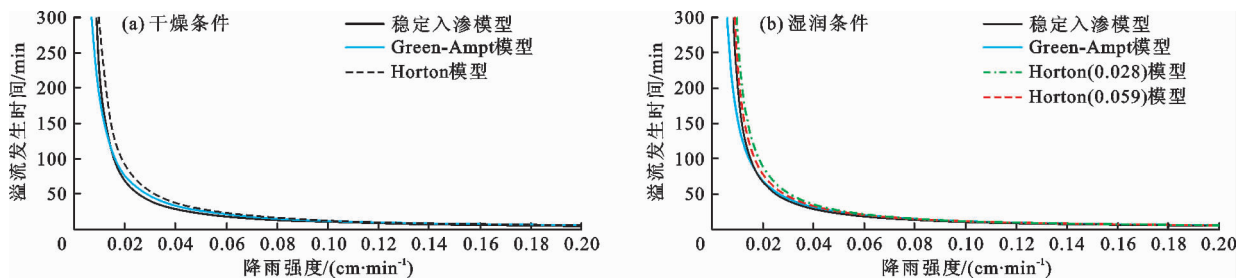


图 3 不同模型在干燥和湿润条件下对溢流发生时间随雨强变化过程的计算结果

由图 3 可看出, 无论在干燥还是湿润条件下, 在降雨强度较小时, 不同入渗模型计算的溢流发生时间差别明显, 随着降雨强度的增大, 不同模型计算的溢流发生时间差值变小; 当降雨强度增大至 0.13 cm/min 以上时, 不同土壤前期条件下、不同模型计算的溢流发生时间绝对差值很小, 均小于 1.0 min。

各入渗模型计算的溢流发生时间的差别与降雨强度有关。在图 3 (a) 所示干燥条件下, 降雨强度分别为 0.01、0.07 和 0.13 cm/min 时, 3 种模型计算的溢流发生时间的最大差值分别为 93.76、3.59 和 1.15 min。在图 3 (b) 所示湿润条件下, 降雨强度分别为 0.01、0.07 和 0.13 cm/min 时, 包括 Horton (0.028) 模型在内的 4 种模型计算的溢流发生时间的最大差值分别为 118.94、2.18 和 0.73 min; 不包括 Horton (0.028) 模型时, 其他 3 种模型计算的溢流发生时间的最大差别分别为 80.67、1.68 和 0.73 min。可见, 3 种模型计算的溢流发生时间的差值随降雨强度的增大逐渐减小, 但 Horton (0.028) 模型在降雨强度较小时与其他模型差别较大, 相比于不考虑 Horton (0.028) 模型的情况, 在降雨强度为 0.01

cm/min 时, 模型间差值扩大了 47.4%, 该差值随降雨强度的增大而减小, 在降雨强度大于 0.13 cm/min 时, 各模型间的差值没有扩大。

各入渗模型计算的溢流时间的差值也与土壤的干湿条件有关。当降雨强度为 0.01 cm/min 时, 在考虑 Horton (0.028) 模型的情况下, 湿润条件下各模型计算的溢流发生时间的最大差值相较于干燥条件下增大了 27%, 在不考虑 Horton (0.028) 模型的情况下, 最大差值相比干燥条件下减小了 14.0%; 降雨强度为 0.07 和 0.13 cm/min 时, 湿润条件下各模型计算的溢流发生时间的最大差值相较于干燥条件下分别减小了 39.0% 和 37.0%。可见, 降雨强度较小时, Horton (0.028) 模型计算的溢流时间相比其他模型更长, 而导致了差值扩大, 但这种差值扩大会随着降雨强度的增大而消失。因此, 3 种模型之间计算的溢流时间差值会随着降雨强度的增大和土壤前期含水率的提高而减小, 但差异主要受降雨强度的影响。

3.2.3 滞蓄总量 当溢流发生时, LID 措施处于积水入渗状态, 此时, LID 措施的滞蓄效果仅与其自身

入渗能力有关。LID措施发生溢流时的滞蓄总量等于其累计入渗量与LID措施表层蓄水量之和。各入渗模型在干燥和湿润条件下计算的不同降雨历时滞蓄总量如图4所示。为区分不同土壤含水状况,图

4中降雨历时分别选取30、60和120 min。图4(b)中对湿润条件下区分干燥条件下 $\beta$ 值的Horton(0.059)模型和湿润条件下 $\beta$ 值的Horton(0.028)模型分别进行分析。

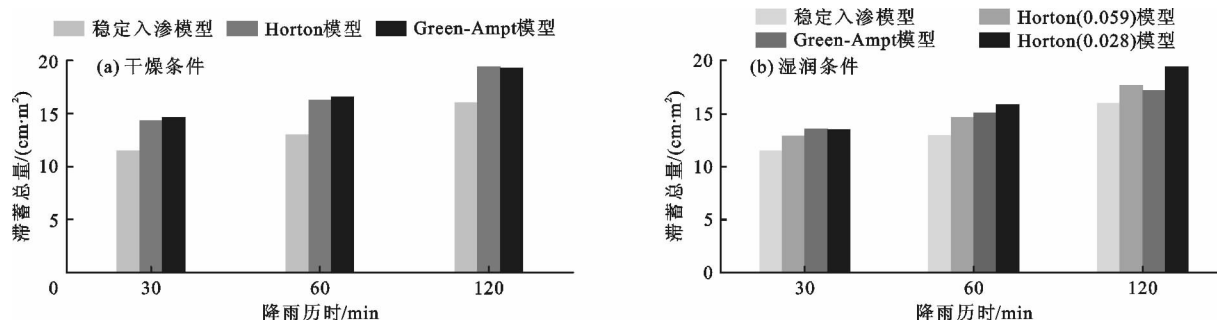


图4 各入渗模型在干燥和湿润条件下计算的不同降雨历时滞蓄总量

由图4可看出,各模型计算的滞蓄总量的相对大小受土壤含水率和降雨历时的影响。在干燥条件下(图4(a)),稳定入渗模型计算的滞蓄总量始终最小,Green-Ampt模型计算的滞蓄总量在短历时情况下大于Horton模型,随降雨历时的增长,Horton模型计算的滞蓄总量逐渐超过Green-Ampt模型的计算值。如降雨历时为30 min时,Green-Ampt模型计算的滞蓄总量比Horton模型的计算值高2.4%,而降雨历时为120 min时,比Horton模型的计算值小0.5%。在湿润条件下(图4(b)),Horton(0.028)模型计算的120 min降雨历时的滞蓄总量达 $19.45 \text{ cm} \cdot \text{m}^2$ ,大于干燥条件下所有模型的滞蓄总量计算值,反映了Horton(0.028)模型的计算入渗率较大,使得计算的滞蓄总量也较大。Green-Ampt模型计算的滞蓄总量在降雨历时为30 min时,比Horton(0.059)模型大5.4%,比Horton(0.028)模型大0.5%,而降雨历时达到120 min时,比Horton(0.059)模型小2.8%,比Horton(0.028)模型小13.1%。随着降雨历时的增长,Green-Ampt模型计算滞蓄总量逐渐小于Horton模型,且随着土壤前期含水率的提高,这种趋势更加明显。

在干燥条件下(图4(a)),降雨历时为30、60、120 min时,3种模型计算的滞蓄总量最大差值分别为3.1、3.6、3.4  $\text{cm} \cdot \text{m}^2$ ;在湿润条件下(图4(b)),降雨历时为30、60、120 min时,不考虑Horton(0.028)的3种模型计算的滞蓄总量最大差值分别是2.1、2.1、1.7  $\text{cm} \cdot \text{m}^2$ ,相比干燥条件下分别减小了32.3%、41.7%、50.0%,考虑Horton(0.028)模型时,3种模型计算的滞蓄总量最大差值分别为2.1、2.9、3.4  $\text{cm} \cdot \text{m}^2$ ,相比干燥条件下分别减小了32.3%、19.4%、0。由此可见,Horton(0.028)模型

计算滞蓄总量与其他模型计算值的差值随降雨历时的增长而增大,降雨历时为30、60、120 min时,相比不考虑Horton(0.028)模型时,模型差值分别增大了0.38%、50%,不考虑Horton(0.028)模型时,3种模型计算结果的差值随降雨历时的增长和土壤前期含水率的增大而稳定减小。

入渗率、溢流发生时间和滞蓄总量模拟结果的差别反映了不同模型各自的特点。从入渗率模拟角度来看,稳定入渗模型取入渗稳定时的入渗率,不受土壤含水率变化的影响,模拟精度最低;Green-Ampt模型的入渗率模拟精度在干燥条件下较高,湿润条件下仍然优于干燥条件下 $\beta$ 值的Horton(0.059)模型;湿润条件下 $\beta$ 值的Horton(0.028)模型的入渗率模拟精度在湿润条件下最高,但在模拟小雨强下的溢流时间和长历时下的滞蓄总量时与其他模型差异较大。相对于干燥条件,湿润条件下Green-Ampt模型的入渗率模拟精度随土壤含水率的增大而降低,Horton模型的入渗率模拟精度随土壤含水率的增大而提高。从溢流发生时间角度来看,降雨强度的增大和前期土壤含水率的提高均会减小不同模型模拟值之间的差别,且该差别主要受降雨强度影响。湿润条件下,Horton(0.028)模型在雨强较小时与其他模型差别较大,在雨强为0.01  $\text{cm}/\text{min}$ 时,Horton(0.028)模型使各模型模拟值的差值增大了47.4%,差值随降雨强度的增大而减小。当雨强增大至0.013  $\text{cm}/\text{min}$ 以上时,干燥条件下,3种模型计算的溢流时间的差值小于1.2 min;湿润条件下,3种模型计算的溢流时间的差值小于0.8 min。从滞蓄总量角度来看,稳定入渗模型的计算滞蓄总量在不同条件下均为最小,Horton模型与Green-Ampt

模型的计算滞蓄总量相对接近, Green - Ampt 模型的计算滞蓄总量随降雨历时增长的增长率相对 Horton 模型更小, 这表明土壤前期含水率对 Green - Ampt 模型计算的滞蓄总量影响更大。不考虑 Horton(0.028)模型时, 其他各模型计算的滞蓄总量差值随降雨强度和土壤前期含水率的增大而逐渐减小; Horton(0.028)模型计算值与其他模型计算值的差值随降雨历时的增大而增大, 当降雨历时为 120 min 时, 相比不考虑 Horton(0.028)模型时的各模型计算值的差值增大 50.0%。

稳定入渗模型不受土壤前期条件的影响, 随着雨强增大、降雨历时增长、土壤含水率上升, 稳定入渗模型计算结果与其他模型之间的差值会逐渐缩小, 能基本满足对 LID 措施滞蓄效果的保守计算。折减系数  $\beta$  对 Horton 模型的计算值影响非常大, 土壤湿润条件下的  $\beta$  拟合值受实测数据波动的影响, 会导致  $\beta$  取值较小, 整体入渗率较高, 从而使计算的溢流时间和滞蓄总量较大。Green - Ampt 模型拟合参数多, 计算相对复杂, 入渗率拟合时误差较小, 对滞蓄总量的计算受土壤含水率变化影响较大, 但总体精度优势相对 Horton 模型并不明显。本文对现有入渗模型的对比与评价是在简化整个降雨过程后进行的, 未来的研究方向是优化模型, 针对不同雨型的降雨事件, 比较不同入渗模型模拟的 LID 措施在滞蓄总量、洪峰削减量、洪峰来临时间上的差别, 更进一步地探索不同入渗模型对 LID 措施滞蓄效果计算的精度和适用性。

## 4 结 论

本文对比了稳定入渗模型、Horton 入渗模型和 Green - Ampt 入渗模型计算 LID 措施滞蓄能力的差异, 结果表明, 稳定入渗模型应用便捷, 但仅能满足对 LID 措施滞蓄效果的保守计算; Horton 模型的折减系数  $\beta$  率定受土壤含水率的影响较大,  $\beta$  在湿润条件下拟合值更小, 导致各项计算结果相对其他模型更大; Green - Ampt 模型参数较多, 应用较复杂, 但入渗率模拟精度相对较高, 对溢流发生时间和滞蓄总量的模拟结果与干燥条件下拟合的 Horton 模型接近。具体结论如下:

(1) 对于入渗率的模拟, 稳定入渗模型的精度最低, Green - Ampt 模型精度略高于 Horton 模型, 随着土壤含水率的增大, Green - Ampt 模型相对误差也增大, 而 Horton 模型相对误差减小。干燥条件下, Green - Ampt 模型相比 Horton 模型相对误差小

20.1%; 湿润条件下, Green - Ampt 模型相比 Horton(0.059)模型相对误差小 3.0%, 比 Horton(0.028)模型相对误差大 4.0%。

(2) 对于溢流发生时间的模拟, 稳定入渗、Horton(0.059)和 Green - Ampt 3 种模型的计算值差值随降雨强度的增加和前期土壤含水率的增大而缩小。当平均雨强大于 0.13 cm/min 时, 各模型计算的平均溢流时间的差值小于 1 min, 湿润条件下的 Horton(0.028)模型与其他模型差别较大。

(3) 对于滞蓄总量的模拟, 稳定入渗模型计算结果相对较小。Green - Ampt 模型与干燥条件下拟合的 Horton 模型计算结果接近, 相对差值始终在 5.4% 以内, 而与湿润条件下拟合的 Horton(0.028)模型差别较大。Horton(0.028)模型计算的滞蓄总量在长历时降雨下明显大于其他模型。

## 参考文献:

- [1] 李亚娇, 徐毓江, 李家科. 低影响开发单项设施模拟模型研究与应用进展[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5): 135 - 141.
- [2] 张建云, 王银堂, 胡庆芳, 等. 海绵城市建设有关问题讨论[J]. 水科学进展, 2016, 27(6): 793 - 799.
- [3] 米文静, 张爱军, 任文渊. 国外低影响开发雨水资源利用对中国海绵城市建设的启示[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 345 - 352.
- [4] PAGE J L, WINSTON R J, MAYES D B, et al. Retrofitting residential streets with stormwater control measures over sandy soils for water quality improvement at the catchment scale [J]. Journal of Environmental Engineering, 2015, 141(4): 04014076.
- [5] 吴丹洁, 詹圣泽, 李友华, 等. 中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究[J]. 中国软科学, 2016(1): 79 - 97.
- [6] 刘文, 陈卫平, 彭 驰. 城市雨洪管理低影响开发技术与利用进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1901 - 1912.
- [7] ZHANG Yixin, ZHAO Weihai, CHEN Xue, et al. Assessment on the effectiveness of urban stormwater management [J]. Water, 2021, 13(1): 13010004.
- [8] YANG H, DICK W A, MCCOY E L, et al. Field evaluation of a new biphasic rain garden for stormwater flow management and pollutant removal [J]. Ecological Engineering, 2013, 54: 22 - 31.
- [9] 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, 2015.
- [10] 杨 正, 李俊奇, 王文亮, 等. 对低影响开发与海绵城市的再认识[J]. 环境工程, 2020, 38(4): 10 - 15 + 38.

(下转第 117 页)

- [17] 曾建军,李元红,金彦兆,等. InVEST 模型在石羊河流域生态系统水源供给中的应用前景与方法[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(6):83-87.
- [18] 吕乐婷,任甜甜,孙才志,等. 1980-2016 年三江源国家公园水源供给及水源涵养功能时空变化研究[J]. 生态学报,2020,40(3):993-1003.
- [19] 周子靖,姜文达,史作琦,等. 东南沿海土地利用转型的生态服务价值研究——以甬江流域为例[J]. 水土保持通报,2020,40(2):308-316.
- [20] 何莎莎,叶露培,朱文博,等. 太行山淇河流域 2000-2015 年土壤侵蚀和水源供给变化研究[J]. 地理研究,2018,37(9):1775-1788.
- [21] REDHEAD J W, STRATFORD C, SHARPS K, et al. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale [J]. Science of the Total Environment, 2016, 569-570: 1418-1426.
- [22] 包玉斌,李婷,柳辉,等. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J]. 地理研究,2016,35(4):664-676.
- [23] 朱昌丽,张继飞,赵宇鸾,等. 青藏高原东缘典型流域生态系统服务的地形梯度效应——以岷江上游为例[J]. 长江流域资源与环境,2017,26(10):1687-1699.
- [24] ZHOU Wenzuo, LIU Gaohuan, PAN Jianjun, et al. Distribution of available soil water capacity in China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2005, 15(1): 3-12.
- [25] 龚诗涵,肖洋,郑华,等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J]. 生态学报,2017,37(7):2455-2462.
- [26] 李文杰,邵学强. 甬江流域入海径流量研究[J]. 浙江水利科技,2007(3):53-55+59.
- [27] 余铭婧. 城镇化背景下水系特征及水文过程变化研究——以甬江流域鄞奉平原为例[D]. 南京:南京大学,2013.
- [28] 李怡颖,范继辉,廖莹. 基于 InVEST 模型的张家口市水源涵养功能时空差异分析[J]. 草业科学,2020,37(7):1313-1324.

(上接第 106 页)

- [11] 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.
- [12] 张彬鸿,李家科,李亚娇. 低影响开发(LID)透水铺装技术研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(4):137-144.
- [13] 唐双成,罗纨,贾忠华,等. 西安市雨水花园蓄渗雨水径流的试验研究[J]. 水土保持学报,2012,26(6):75-79+84.
- [14] 侯精明,李东来,王小军,等. 建筑小区尺度下 LID 措施前期条件对径流调控效果影响模拟[J]. 水科学进展,2019,30(1):45-55.
- [15] 石宝山,侯精明,李丙尧,等. 基于 Green-Ampt 和稳渗不同入渗模型下的城市内涝影响数值模拟[J]. 南水北调与水利科技,2019,17(5):115-123.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑与小区雨水控制及利用工程技术规范:GB 50400—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [17] 孟莹莹,陈茂福,张书函. 植草沟滞蓄城市道路雨水的试验及模拟[J]. 水科学进展,2018,29(5):636-644.
- [18] 薛凯喜,赵宝云,胡艳香,等. 非饱和红壤土降雨入渗室内模拟试验[J]. 地球与环境,2016,44(3):382-389.
- [19] HSU S Y, HILPERT M. Incorporation of dynamic capillary pressure into the Green-Ampt model for infiltration [J]. Vadose Zone Journal, 2011, 10(2): 642-653.
- [20] 李毅,王全九,邵明安,等. Green-Ampt 入渗模型及其应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(2):225-230.
- [21] 张振华,潘英华,蔡焕杰,等. Green-Ampt 模型入渗率显式近似解研究[J]. 农业系统科学与综合研究,2006,22(4):308-311.