

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2019.0117

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. SHI B S, HOU J M, LI B Y, et al. Study on numerical simulation of urban inundation effects based on Green-Ampt and constant infiltration models[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5):115-123. (in Chinese)

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

石宝山¹,侯精明¹,李丙尧¹,郭凯华¹,苏锋²,邓朝显³,付德宇⁴

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,西安 710048;2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,西安 710065;3. 陕西省西咸新区沣西新城开发建设(集团)有限公司海绵城市技术中心,西安 712000;4. 宁夏首创海绵城市建设发展有限公司,宁夏 固原 756000)

摘要:为分析 Green-Ampt 和稳渗两种入渗模型对城市内涝的影响,以陕西省西咸新区沣西新城核心区为研究区域,应用基于水文及水动力方法的城市雨洪过程数值模型模拟城市暴雨致涝过程。以 Green-Ampt 入渗模型计算产流,模拟研究区内涝积水过程,发现计算数据与实测数据吻合度高,内涝积水点均实现精确的模拟。计算了1、2、5、10、20、50 a 6种不同重现期设计降雨在两种不同入渗模型下的内涝积水总量与总面积的变化,结果表明:城市内涝积水达到峰值时,不同降雨重现期下 Green-Ampt 入渗下相较于稳渗内涝积水总量分别减少 28.41%、26.49%、26.39%、21.04%、17.28%、15.02%,Ⅲ级及以上内涝积水总面积分别减少 31.5%、28.6%、28.3%、20.7%、16.3%、12.7%。本研究应用不同入渗模型揭示了内涝积水程度在不同降雨重现期下的变化规律,对更合理地开展数值模型模拟以及城市雨洪管理工作具有重要借鉴意义。

关键词:Green-Ampt 模型;稳渗;设计降雨;城市内涝;数值模拟

中图分类号:TU992 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on numerical simulation of urban inundation effects based on Green-Ampt and constant infiltration models

SHI Baoshan¹, HOU Jingming¹, LI Bingyao¹, GUO Kaihua¹, SU Feng², DENG Chaoxian³, FU Deyu⁴

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China; 3. The Technology Research Center for Sponge City, Fengxi New City Development and Construction Group Co., Ltd of Shaanxi Xixian New Area, Xi'an 712000, China; 4. Ningxia Capital Sponge City Construction & Development CO, LTD, Guyuan 756000, China)

Abstract: In order to analyze the influences of Green-Ampt and constant infiltration models on the numerical simulation results

收稿日期:2019-03-14 修回日期:2019-06-04 网络出版时间:2019-06-26

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190625.1132.006.html>

基金项目:陕西省国际科技合作交流计划项目(2017KW-014);陕西省水利科技项目(Grant No. 2017slki-14);陕西省科技厅项目(Grant No. 2017JQ3043);西咸新区沣西新城海绵城市基础研究资金资助(2018610002000097);2017年宁夏建设科技计划项目:海绵城市建设效果关键指标数值模拟研究(2017-HMKT-01)

作者简介:石宝山(1995—),男,甘肃武威人,主要从事城市水文学方面研究。E-mail:2180421229@stu.xaut.edu.cn

通信作者:侯精明(1982—),男,河北怀安人,教授,博士,主要从事地表水动力及其附随过程数值模型研究。E-mail:jingming.hou@xaut.edu.cn

of urban inundation, Fengxi New City is taken as a case study to simulate the inundation processing by a urban stormwater numerical model based on hydrological and hydrodynamic methods. Using the Green-Ampt model to calculate the runoff process, the water accumulation in study area is simulated. It is found that the simulation result shows a good agreement with the measured one, and the inundation point can be accurately simulated. The changes of the total water quantity and inundation area are calculated by using these two different infiltration model with the return period of 1 a, 2 a, 5 a, 10 a, 20 a and 50 a respectively. The results show that when the accumulated water reaches its peak value under the different rainfall return period, the water quantity under Green-Ampt model is reduced by 28.41%, 26.49%, 26.39%, 21.04%, 17.28%, and 15.02% respectively compared with the constant infiltration model. The total area of water in Class III and above decreased by 31.5%, 28.6%, 28.3%, 20.7%, 16.3%, and 12.7% respectively. This study reveals that the changing law of the inundation degree in different infiltration models under different rainfall return periods, and is of great significance for the more reasonable implementation of numerical model simulation and urban stormwater management.

Key words: Green-Ampt infiltration; steady infiltration; design rainfall; urban guilt; numerical model

随着人们生活水平的不断提高、城市化的快速发展、下垫面不透水面积比例的不断增加以及全球气候的变化,极端暴雨天气频繁发生,城市遭受严重内涝,严重影响了人们的生产生活,造成了较大的经济损失^[1-2]。为解决城市内涝问题,我国将低影响开发(Low Impact Development, LID)理念融入城市雨水系统规划和建设,积极开展“海绵城市”试点建设^[3]。因此,利用城市雨洪管理模型,预测城市洪涝过程,对后续城市建设以及雨洪管理具有非常重要的指导意义^[4]。

目前,关于城市雨洪模型的研究中,大都采用水文及水动力方法,对其降雨径流及内涝形成过程进行模拟分析。其中模型产流部分的模拟对透水地表采用的方法有所不同,常用于计算地面入渗损失和地表产流方法如 Green-Ampt(G-A)模型、Horton模型、Philip模型等^[5-7]均较为简单,多为经验或简化公式,但可描述城市复杂下垫面的产流过程,其中 G-A 模型对土壤资料要求很高,为简化入渗,将入渗过程等效为稳定入渗(稳渗),可近似描述透水地表入渗过程。例如 Chen 等^[8]应用地形分析技术建立城市洪涝模拟模型,采用 G-A 模型计算下垫面入渗损失,管网部分采用稳渗率方法计算,同时采用平静水面(flat-water)方法计算积涝过程;甘永德等^[9]以 G-A 模型为基础并考虑土壤膨胀性,提出了非稳定降雨入渗产流模型(GJGAM),利用该模型模拟得到的土壤累计入渗量和径流强度与其实测结果吻合良好,表明 G-A 模型适合描述膨胀性土壤的降雨入渗产流过程;侯精明等^[10]应用高分辨率 DEM 表征实际地形的基础上,进行城市尺度的降雨径流过程模拟时运用了等效入渗描述入渗过程,通过实际测量发现,研究区内所有的内涝积水位置被准确捕捉。目前城市规划、建设和管理中,SWMM 模型无

法精确模拟地表积水和淹没过程,在部分应用中存在不足^[11-12]。因此本文引入基于二维动力波方法的耦合了水文及水动力过程的数值模型 GAST(GPU Accelerated Surface Water Flow and Associated Transport),对所耦合的 G-A 模型和稳渗进行城市内涝积水模拟,藉此量化两种入渗模型在洪涝模拟中的规律与关系,为城市内涝数值模拟计算提供合适的参考。

1 数学模型及其求解方法

1.1 模型控制方程

应用一种基于显卡加速的地表水及其伴随输移过程模型 GAST(GPU Accelerated Surface Water Flow and Transport Model)进行模拟计算,控制方程为平面二维浅水方程(简称 SWEs)。忽略运动黏性项、紊流黏性项、风应力和科氏力,二维非线性浅水方程的守恒格式可用如下矢量形式表示。

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = S \quad (1)$$

其中

$$q = \begin{bmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} uh \\ uq_x + gh^2/2 \\ uq_y \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} vh \\ vq_x \\ vq_y + gh^2/2 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} i \\ -gh\partial z_b/\partial x \\ -gh\partial z_b/\partial y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -C_f u \sqrt{u^2 + v^2} \\ -C_f v \sqrt{u^2 + v^2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: q 为变量矢量; h 为水深(m); q_x 、 q_y 分别为 x 、 y 方向的单宽流量(m^3/s); g 为重力加速度(m/s^2); u 和 v 分别为 x 、 y 方向的流速(m/s); F 和 G 分别为 x 、 y 方向的通量矢量; S 为源项矢量; i 为入渗源项; z_b 为河床底面高程(m); $C_f = gn^2/h^{1/3}$ 为谢才系

数($m^{1/2}/s$); n 为曼宁系数。

1.2 数值方法

为模拟研究区域内降雨致涝过程,引入耦合水文水动力过程的数值模型,该模型运用 Godunov 类型的有限体积法求解二维浅水方程^[13],从而保证计算过程中的物质守恒和求解连续性的问题。水和动量通量通过 HLLC 近似黎曼求解器(Harten, Lax and van Leer approximate Riemann solver with the contact wave restored)计算。底坡源项采用底坡通量法处理,以适用任何复杂网格,摩阻力计算使用稳定性较好的半隐式法,时间推进采用二步龙格-库塔方法^[14]来推进。同时采用 GPU(Graphics Processing Unit)并行计算技术^[15],提高模拟效率,从而实现大范围高效计算。该模型有较高的精度和计算效率,适用于大尺度、过程复杂的城市雨洪过程模拟,且在文献^[13]中通过对城市及小流域模拟结果与实测数据的良好对比分析获得验证。

1.3 G-A 入渗模型

为描述土壤水分入渗特性,应用 G-A 入渗模型,根据基本假定^[16-17],G-A 入渗模型^[18]基本表达式为

$$f_p = \begin{cases} R & t \leq t_p \\ K_s [1 + (\theta_s - \theta_i) S_f / I_p] & t > t_p \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_p 为入渗率(cm/min); K_s 土壤饱和导水率(cm/min); θ_i 和 θ_s 分别为土壤初始含水率及饱和含水率(cm^3/cm^3); S_f 湿润锋面吸力(cm); t_p 为降雨后开始积水的时间(min); R 为降雨强度(cm/min); I_p 为累计入渗量(cm), $I_p = t_p R$ 。

1.4 稳定入渗

稳定入渗率是指土壤含水量达到了田间持水量以上,达到入渗容量的最小值,此时入渗率变为常数,它等于或接近饱和导水率,整个入渗过程进入稳渗阶段^[7,19-20]。

2 模型构建

2.1 研究区概况

研究区域位于陕西省西咸新区沣西新城海绵城市部分核心区,占地面积约为 1.6 km^2 。区内降雨量年际变化大,季节分配不均匀,雨水多集中于 7—9 月。研究区内存在 5 种土地利用,分别为居民用地、道路、林地、草地、裸土地方式,下垫面情况复杂,且易发生内涝灾害。研究区域区位示意图见图 1。



图 1 研究区域区位示意图

Fig. 1 Location of study area

2.2 模型参数率定

模型以降雨资料、地形资料、土地利用及入渗资料四部分为输入的资料。其中:降雨强度为 500 mm/h 的恒定降雨,降雨历时 6480 s ,模拟时长 6480 s ;土地利用类型和土壤种类只有一种,选取 G-A 入渗描述下垫面入渗过程;土壤饱和导水率、湿润锋处的表面吸力、土壤饱和含水率与初始含水率之差参照文献确定^[21-25];地形采用网格精度为 1 m 的 DEM 数据,共计 3136 个方形网格单元。模型边界为闭边界,计算时库朗数为 0.5 。

本次模拟研究区不同土地利用的入渗过程,分别为雨水花园、林地、草地等,用双环入渗仪测量雨水花园、林地、草地等典型区域入渗率,模拟入渗率与实测入渗率见图 2,率定结果见表 1。图和表表明模拟结果与实测吻合度较高,但由于试验过程中观测误差与自然条件等外界因素的影响,模拟结果与实测略有偏差。经计算,纳什效率系数分别为 0.3500 、 0.8135 、 0.9174 ,表明参数率定结果合理。

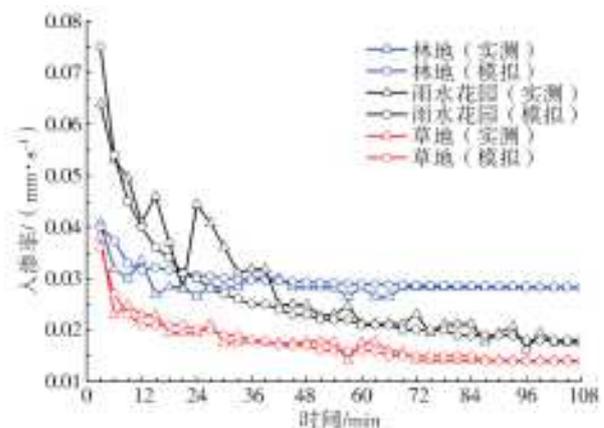


图 2 实测与模拟入渗率随时间变化

Fig. 2 Experimental and simulated infiltration rates as time varying

2.3 模型验证

模型输入资料包括降雨资料、地形数据、曼宁系数、土地利用类型、土壤种类、土壤饱和导水率、湿润锋表面吸力、饱和含水率与初始含水率之差等 8 部分。以西咸新区云谷 10 号气象站所测的

2016 年 8 月 25 日降雨数据为模型的降雨输入数据,其降雨历时为 7 h,累计降雨量为 66 mm,降雨过程见图 3。

表 1 下垫面参数设置与率定结果

Tab. 1 Parameters setting and calibration results of underlying surface

土地利用	参考取值		率定结果	
	$K_s/(mm \cdot s^{-1})$	S/mm	$K_s/(mm \cdot s^{-1})$	S/mm
雨水花园	0.057 9	63.885 2	0.027 5	60
草地	0.010 4	16.448 0	0.010 0	40
林地	0.010 4	21.930 0	0.010 5	20
裸土地	0.004 0	37.901 6	—	—

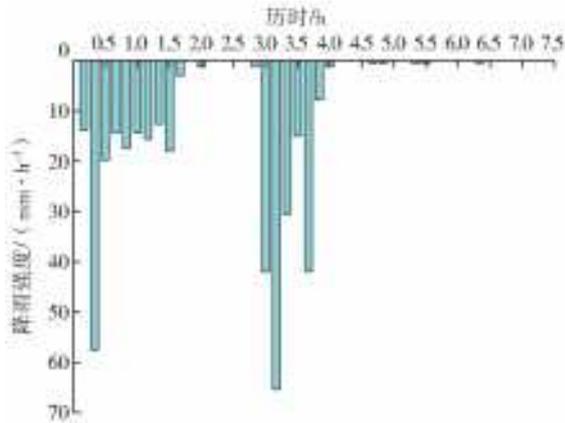


图 3 云谷 10 号气象站实测降雨过程(2016 年 8 月 25 日)

Fig. 3 Measured precipitation in the Yungu 10th weather station on 8/25/2016

在地形文件选择时,高精度的地形文件可反应真实地表形态以及有效水力通道,因此,地形精度直接影响了模拟结果的准确性。采用无人机航测技术,获取研究区域内高精度 DEM 和 DOM 数据,得到研究区域内正射影像图及数字高程见图 4、图 5。

根据西咸新区海绵技术中心提供的地勘报告,确定研究区下垫面土壤属于非湿陷性黄土。每种土



图 4 研究区正射影像

Fig. 4 Orthoimage of study area

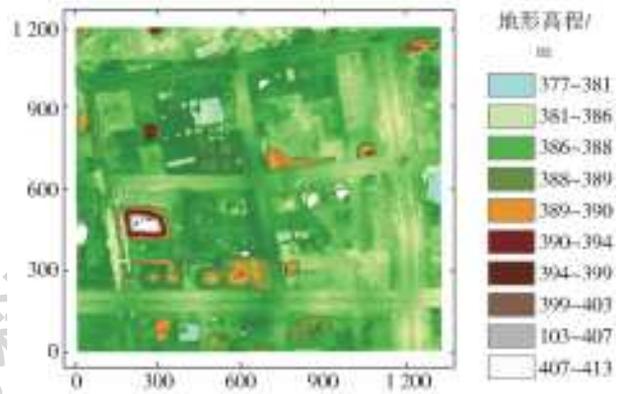


图 5 研究区数字高程

Fig. 5 DEM of study area

地利用的曼宁系数根据相关文献确定^[26-27]。林地、草地土壤饱和导水率、湿润锋表面吸力、土壤饱和含水率与初始含水率之差取值为率定结果,裸土地土壤饱和导水率、湿润锋表面吸力、饱和含水率与初始含水率之差取值根据参考文献确定^[22]。土地利用类型及参数取值见表 2。

表 2 土地利用类型及参数

Tab. 2 Land use types and parameters

土地利用	居民用地	道路	林地	草地	裸土地
土壤饱和导水率 $K_s/(mm \cdot s^{-1})$	0	0	0.010 5	0.010 0	0.004 1
湿润锋表面吸力 S/mm	0	0	20	40	38.000 0
饱和含水率与初始含水率之差	0	0	0.3	0.3	0.300 0
曼宁系数	0.015	0.014	0.400 0	0.240 0	0.080 0

在计算下渗损失时,考虑城市的管网排水量,研究区排水管渠设计重现期为 1 a 一遇。根据雨水管道布设方案,设计时采用暴雨强度公式

$$q = \frac{1239.91 \times (1 + 1.971 \times \lg P)}{(t + 7.4246)^{0.8124}} \quad (4)$$

式中: q 为暴雨强度($L/(s \cdot hm^2)$); P 为重现期(a); t 为降雨历时(min)。

由上述公式计算可得,管网排水可以对应峰值强度为 10.47 mm/h 的降雨。将管网排水能力按照等效入渗方法处理,即按照实际管网排水设计标准,将管网最大排水能力等效为入渗率叠加于土地利用入渗率上,等效入渗的水量认为是管网的外排水量^[10]。

模拟计算时采用开边界,边界无入流,计算过程中库朗数采用 0.5,模拟降雨至 7.5 h 后的积水过

程。随着降雨强度的迅速增加,初始干燥土壤很快被水饱和,超过土地利用下渗能力时,便形成地表径流。由图 6(a)可确定降雨 0.500 h 时,已形成径流,且流量不断增加,降雨达到 3.833 h 时,内涝积水达到峰值如图 6(b)所示,图中标出了 7 处积水点片与

实际检测记录一致,其中 A、B、C、D 四处为典型积水点面积与实测面积相近,见表 3。模拟结果的径流变化趋势与实际相符,模拟效果较好。因此,GAST 模型耦合 G-A 入渗模型在城市雨洪过程模拟中能较好的服务于洪涝预测。

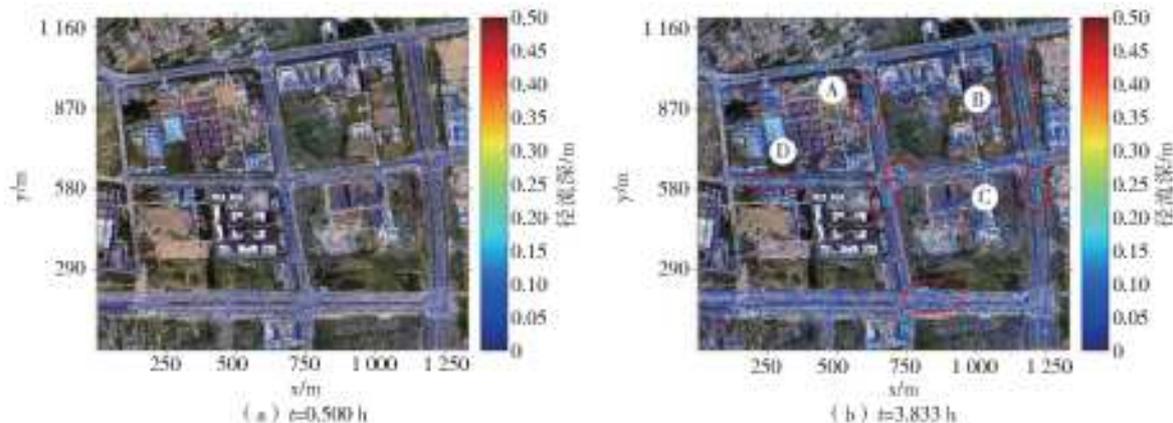


图 6 研究区域内涝积水过程
Fig. 6 Water accumulation process in the study area

表 3 模拟积水程度与实际情况对比($t=3.833$ h)

Tab. 3 Comparison of the modeled and measured inundation patterns ($t=3.833$ h)

内涝位置	积水面积/ m^2		平均相对误差/%
	模拟	实测	
A	1 588	1 536	3.39
B	9 876	9 600	2.89
C	4 040	3 720	8.60
D	2 488	2 254	10.38

3 模型应用

3.1 设计降雨

模型计算采用开放边界,四周无入流,计算过程中库朗数为 0.5,模拟时长 4 h。应用公式(4)计算得到 6 个重现期下(1、2、5、10、20、50 a)降雨历时为 2 h 的 6 场降雨,各场设计降雨过程见图 7。

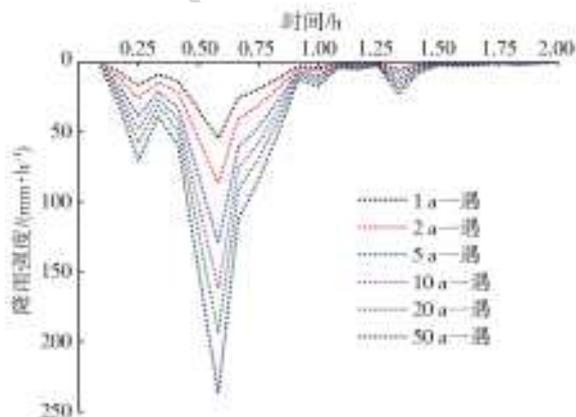


图 7 不同重现期下设计降雨过程

Fig. 7 Designing rainfall process under different return periods

3.2 内涝积水总量分析

研究区积水总量可表征内涝积水情况。对研究区域内各个积水点积水总量累积得到区域积水总量,在 1、2、5、10、20、50 a 降雨条件下,分别用 G-A 入渗或稳渗模拟计算得到研究区域内涝积水总量,各时刻内涝积水总量见表 4。两种不同入渗条件下,起初降雨强度均小于入渗率,地表内涝积水总量为 0,随着降雨强度的增加,土壤饱和后,地表开始产生积水,地表内涝积水总量逐渐增大,其典型重现期内涝积水总量随时间变化过程见图 8。0.916 67 h 时内涝积水总量达到峰值,G-A 入渗条件下内涝积水总量分别为 3 652、8 608、21 502、35 502、51 146、72 746 m^3 。稳渗下内涝积水总量分别为 5 102、11 711、29 214、44 962、61 833、85 602 m^3 。经计算,内涝积水总量达到峰值时,G-A 入渗下内涝积水比稳渗下内涝积水减少 28.41%、26.49%、26.39%、21.04%、17.28%、15.02%。可见,随着降雨重现期的减小,内涝积水总量达到峰值时,G-A 入渗比稳渗下内涝积水总量减少的百分比逐渐增大。0.916 67~2 h 时,由于降雨强度小于入渗率,因此内涝积水总量随时间增大而降低,2~4 h,降雨停止。

3.3 内涝积水面积分析

李世豪等^[29]对城市内涝风险等级按积水深度划分为 IV 级。III 级及以上内涝积水水深较大,严重影响城区居民生活,着重对 III 级及以上内涝积水总

表 4 不同重现期各时刻内涝积水总量

Tab. 4 Total amount of water accumulated at different times under different return periods

单位: m³

降雨重现期	入渗条件	降雨历时/h								
		0.5	0.916 67	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
1 a 一遇	G-A 入渗	233	3 652	3 547	3 034	2 577	2 205	1 898	1 634	1 427
	稳渗	488	5 102	4 965	4 226	3 586	3 054	2 635	2 280	1 979
2 a 一遇	G-A 入渗	112	8 608	8 394	7 091	6 038	5 206	4 554	4 017	3 554
	稳渗	144	11 711	11 454	9 826	8 375	7 180	6 251	5 460	4 833
5 a 一遇	G-A 入渗	2 137	21 502	20 956	17 828	15 153	13 120	11 537	10 239	9 156
	稳渗	3 014	29 214	28 789	25 661	22 510	19 726	17 476	15 523	13 902
10 a 一遇	G-A 入渗	2 198	10 119	9 789	8 425	7 221	6 266	5 511	4 902	4 395
	稳渗	2 935	12 513	12 242	11 122	9 931	8 877	7 974	7 198.9	6 525
20 a 一遇	G-A 入渗	10 270	51 146	50 209	44 469	38 760	34 064	30 310	27 187	24 522
	稳渗	13 839	61 833	61 293	56 980	51 773	46 966	42 730	39 013	35 760
50 a 一遇	G-A 入渗	17 756	72 746	71 557	64 464	57 204	51 053	45 935	41 647	37 964
	稳渗	23 724	85 602	84 849	79 365	73 069	67 281	62 101	57 444	53 310

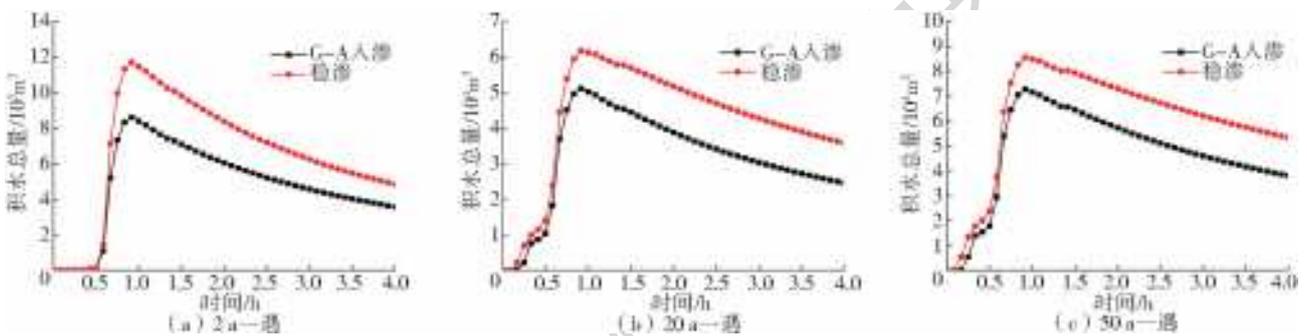


图 8 典型重现期积水总量变化过程

Fig. 8 Changing process of total water volume under different return periods

面积进行量化计算,得出不同入渗条件下不同重现期降雨内涝积水总面积见表 5,通过对研究区域达到中度内涝及以上内涝积水总面积随时间变化过程的分析得出:当降雨量满足地表截流、填洼且大于入渗

量时,地表开始积水并形成径流,低洼地区便形成内涝积水区域,其典型重现期内涝积水总面积随时间变化过程见图 9。不同重现期降雨下内涝积水达到峰值时,在不同入渗条件下,内涝积水总面积逐渐增

表 5 不同重现期各时刻内涝积水总面积

Tab. 5 Total area of water accumulated at various times under different return periods

单位: m²

降雨重现期	入渗条件	降雨历时/h								
		0.5	0.916 7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
1 a 一遇	G-A 入渗	348	10 588	10 208	8 780	7 544	6 632	5 824	5 068	4 360
	稳渗	804	15 468	14 824	12 648	10 996	9 572	8 368	7 268	6 344
2 a 一遇	G-A 入渗	232	30 196	28 932	24 000	20 472	17 724	15 452	13 876	12 108
	稳渗	316	42 316	40 736	33 812	28 880	24 912	21 560	19 368	16 720
5 a 一遇	G-A 入渗	5 292	84 372	81 344	67 804	57 468	49 552	43 452	38 524	34 568
	稳渗	8 096	117 608	114 544	99 044	85 232	74 140	65 444	58 252	52 400
10 a 一遇	G-A 入渗	17 948	143 448	138 576	116 588	99 572	86 176	75 388	66 732	59 700
	稳渗	25 796	180 972	176 884	155 376	137 440	121 912	109 580	98 328	89 184
20 a 一遇	G-A 入渗	37 504	202 932	196 136	166 380	144 308	126 864	112 360	100 028	89 780
	稳渗	52 116	242 348	237 096	211 356	187 612	169 756	154 376	140 668	128 972
50 a 一遇	G-A 入渗	69 356	276 172	267 352	233 496	204 728	183 088	164 480	147 956	133 476
	稳渗	93 300	316 428	308 444	277 992	252 444	231 920	214 800	197 376	182 620

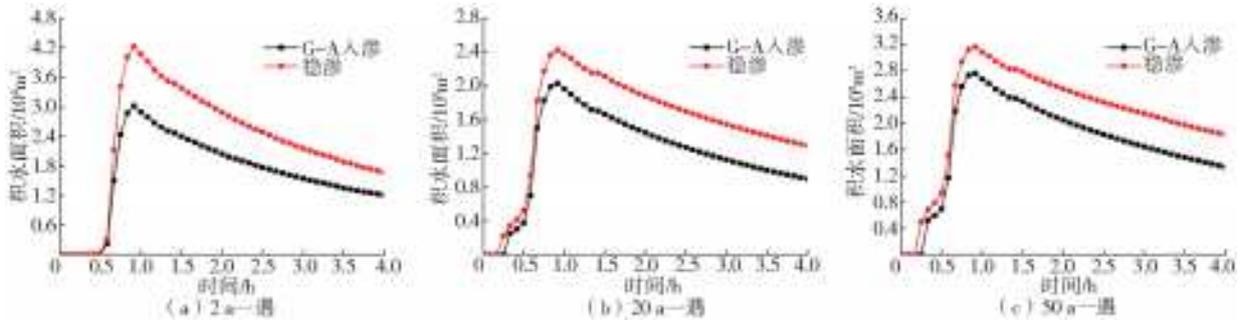


图9 典型重现期内涝积水面积

Fig. 9 Changing process of total water volume under different return periods

大;G-A 入渗下内涝积水面积分别为 10 588、30 196、84 372、143 448、202 932、276 172 m²; 稳渗下内涝积水面积分别为 15 468、42 316、117 608、180 972、242 348、316 428 m²。G-A 入渗下比稳渗下内涝积水面积减少 31.5%、28.6%、28.3%、20.7%、16.3%、12.7%。可见

随着降雨重现期的减小,内涝积水总面积最大时,G-A 入渗比稳渗下内涝积水总面积减少的百分比逐渐增大。图 10 展示了 20、50 a 设计降雨在不同入渗条件下内涝积水达到峰值时的水深分布,明确显示内涝积水点位置、积水总量及积水总面积变化。

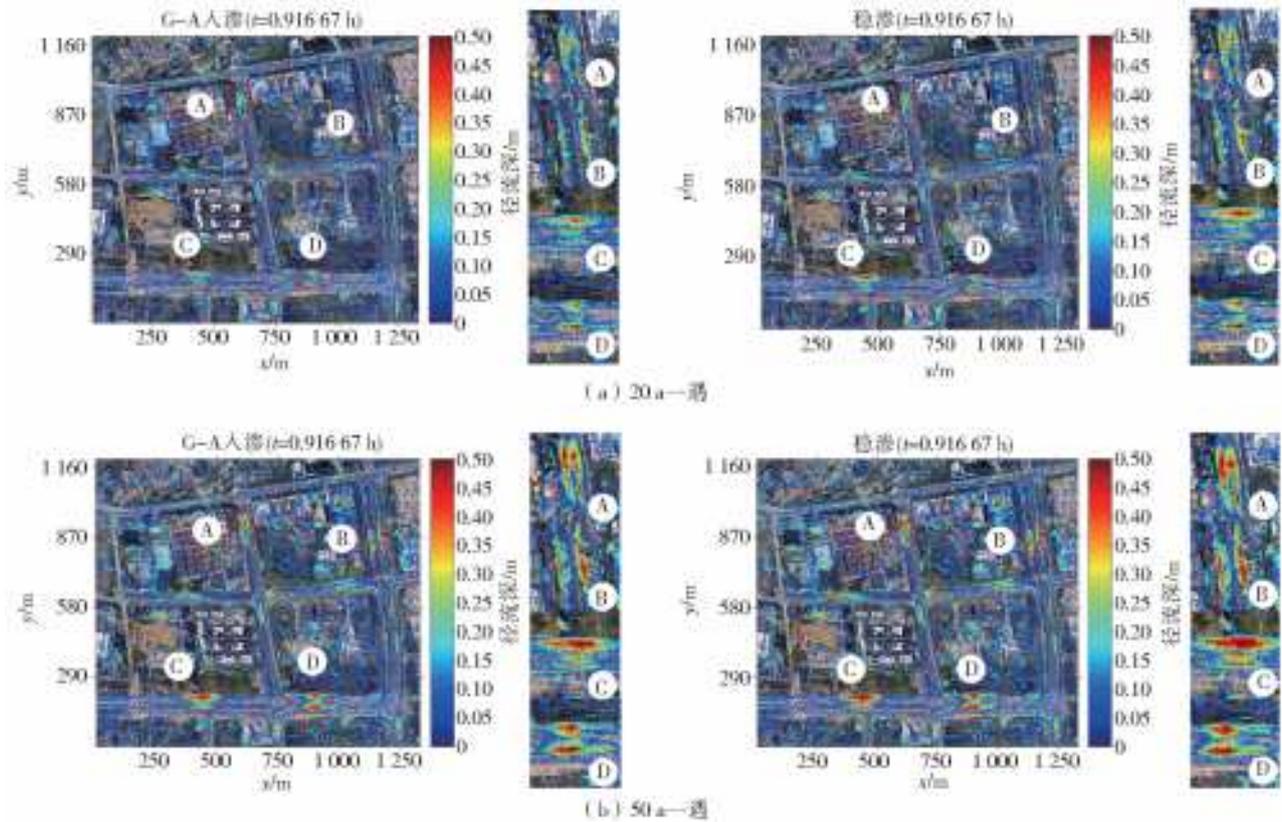


图 10 设计降雨在不同入渗条件下内涝积水

Fig. 10 Water accumulation with different designed rainfalls and different infiltration conditions

4 结论

为精确模拟 G-A 模型和稳渗模型下地表积水内涝过程,本文引入了水文及水动力过程的数值模型。以西咸新区沣西新城核心区为研究对象,耦合 G-A 入渗模型模拟不同土地利用类型入渗率随时间变化过程与双环实测入渗率对比分析,并根据已率定的参数进行模型验证,最后计算研究区在不

同重现期设计降雨条件下耦合 G-A 入渗或稳渗模拟城市内涝积水过程,可得结论如下。

(1)GAST 模型耦合 G-A 入渗模型模拟下渗过程与双环实测下渗过程吻合度较高,通过计算纳什效率系数进行误差分析,土地利用分别为雨水花园、林地、草地时,纳什效率系数分别为 0.350 0、0.813 5、0.917 4,且土地利用为林地、草地时纳什效率系数接近 1,模型可信。

(2)通过对西咸新区沣西新城核心区进行模拟,并与实测数据验证,可得该场降雨中研究区域内所有的内涝积水位置(共 7 处)被准确模拟,其中四处典型内涝积水范围与实测积水范围相近,实际应用证实了该模型可适用于高精度大范围的城市雨洪过程模拟。

(3)在不同重现期设计降雨条件下,当积水总量达到峰值时,随着重现期的减小,G-A 入渗地表内涝积水总量和内涝积水总面积与稳渗相比减少量呈逐渐增多趋势,揭示了设计降雨在不同入渗条件下与内涝积水程度的变化规律,对更合理地开展城市雨洪管理工作具有借鉴意义。

参考文献(References):

- [1] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 485-491. (ZHANG J Y, WANG Y T, HE R M, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 485-491. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2016. 04. 001.
- [2] 王伟武,汪琴,林晖,等. 中国城市内涝研究综述及展望[J]. 城市问题, 2015(10): 24-28. (WANG W W, WANG Q, LIN H. et al. A summary and prospect of the research on urban infighting in China[J]. Urban Problems Urban Probl, 2015(10): 24-28. (in Chinese)) DOI: 10. 3239/j. sshkxy. Wt. 004.
- [3] 严登华,王浩,张建云,等. 生态海绵智慧流域建设:从状态改变到能力提升[J]. 水科学进展, 2017, 28(2): 302-310. (YAN D H, WANG H, ZHANG J Y. et al. Construction of an ecological sponge-smart river basins: from changing status to improving capability [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(2): 302-310. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2017. 02. 016.
- [4] 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. (XU Z X, CHENG T. Basic theory for urban water management and sponge city-review on urban hydrology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1): 53-61. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2018. 1056.
- [5] 王文焰,汪志荣,王全九,等. 黄土中 Green-Ampt 入渗模型的改进与验证[J]. 水利学报, 2003(5): 30-34. (WANG W Y, WANG Z R, WANG Q J. et al. Improvement and evaluation of the Green-Ampt model in loess soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(5): 30-34. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2003. 05. 005.
- [6] 周秋文,朱红. 基于 Horton 模型的涟江流域马尾松林冠截留模拟[J]. 生态科学, 2018, 37(2): 43-49. (ZHOU Q W, ZHU H. Simulation of canopy interception of Pinus massoniana forest in Lijiang River basin based on Horton Model[J]. Ecological Science Ecol Sci, 2018, 37(2): 43-49. (in Chinese)) DOI: 10. 14108/j. cnki. 1008-8873. 2018. 02. 006.
- [7] 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. (WANG Q J, LAI J B, LI Y. Comparison of Green-Ampt model with Philip infiltration model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(2): 13-16 (in Chinese))
- [8] CHEN J, HILL A A, URBANO L D. A GIS-based model for urban flood inundation [J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2009, 373 (1-2): 184-192. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2009. 04. 021.
- [9] 甘永德,贾仰文,刘欢,等. 膨胀性土壤降雨入渗产流模型[J]. 水利学报, 2017, 48(10): 1220-1228, 1239. (GAN Y D, JIA Y W, LIU H. et al. Elastic foundation beam model of frost heave damage of trapezoidal canal considering interaction between frozen soil and lining structure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(10): 1220-1228, 1239 (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20170054.
- [10] 侯精明,王润,李国栋,等. 基于动力波法的高效高分辨率城市雨洪过程数值模型[J]. 水力发电学报, 2018, 37(3): 40-49. (HOU J M, WANG R, LI G D, et al. High-performance numerical model for high-resolution urban rainfall-runoff process based on dynamic wave method[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(3): 40-49. (in Chinese)) DOI: 10. 11660/slfjdx. 20180305.
- [11] 李允军,徐青,周元斌,等. 二维水动力学模型在蓄滞洪区洪水演进模拟分析中的应用[J]. 江苏水利, 2018(12): 68-72. (LI Y J, XU Q, ZHOU Y B, et al. Application of 2-D hydrodynamic model on flood routing simulation analysis in flood storage and detention area [J]. Jiangsu Water Resources, 2018(12): 68-72. (in Chinese)) DOI: 10. 16310/j. cnki. jssl. 2018. 12. 016.
- [12] 夏军,张印,梁昌梅,等. 城市雨洪模型研究综述[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(2): 95-105. (XIA J, ZHANG Y, LIANG C M, et al. Review on urban storm water models[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(2): 95-105. (in Chinese)) DOI: 10. 14188/j. 1671-8844. 2018-02-001.
- [13] HOU J, LIANG Q, ZHANG H, et al. An efficient

- unstructured MUSCL scheme for solving the 2D shallow water equations[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2015, 66: 131-152. DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.12.007.
- [14] HOU J, SIMONS F, MAHGOUB M, et al. A robust well-balanced model on unstructured grids for shallow water flows with wetting and drying over complex topography [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2013, 257: 126-149. DOI: 10.1016/j.cma.2013.01.015.
- [15] HOU J, ZGEN I. A model for overland flow and associated processes within the hydroinformatics modelling system[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2014, 16(2): 375-391. DOI: 10.2166/hydro.2013.173.
- [16] HSU S Y, HILPERT M. Incorporation of dynamic capillary pressure into the Green-Ampt model for infiltration[J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10(3): 1116.
- [17] 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. (LI Y, WANG Q J, SHAO M A, et al. Green-Ampt model and its application[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2007, 35(2): 225-230. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1671-9387.2007.02.045.
- [18] ROSSMAN L. Storm water management model (SWMM) user's manual version 5.0[R]. Cincinnati: USEPA, 010.
- [19] 王全九, 邵明安, 汪志荣, 等. Green-Ampt 公式在层状土入渗模拟计算中的应用[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5(4): 66-70. (WANG Q J, SHAO M A, WANG Z R, et al. Application of Green-Ampt equation during infiltration in layered soil[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 5(4): 66-70. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1009-2242.1999.04.013.
- [20] 范文涛, 牛文全, 张振华, 等. 降水头垂直入渗 Green-Ampt 模型显式近似解研究[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 31(1): 50-53. (FAN W T, NIU W Q, ZHANG Z H, et al. (Approximate explicit solution to precipitation head vertical infiltration of Green-Ampt Model[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(1): 50-53. (in Chinese))
- [21] 唐岳灏, 路立新. Green-Ampt 入渗模型的一种显式近似解[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(6): 19-22. (TANG Y H, LU L X. An Explicit approximate solution of Green-Ampt Model[J]. *Water Resources and Power*, 2017, 35(6): 19-22. (in Chinese))
- [22] 曹瑞雪, 邵明安, 贾小旭. 层状土壤饱和和导水率影响的试验研究[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 18-21. (CAO R X, SHAO M A, JIA X X. Experimental study on effects of layered soils on saturated hydraulic conductivity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(3): 18-21. (in Chinese)) DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2015.03.004.
- [23] 李斌兵, 郑粉莉. 黄土坡面不同土地利用下的降雨入渗模拟与数值计算[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(5): 118-123. (LI B B, ZHENG F L. Rainfall infiltration simulation and numerical computation at different land use on the loessial hillslope [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(5): 118-123. (in Chinese))
- [24] 刘哲, 陈田庆, 张雷. 基于海绵城市目标渭东新城土壤性状调查及研究分析[J]. *西部大开发(土地开发工程研究)*, 2018, 3(7): 20-25. (LIU Z, CHEN T Q, ZHANG L. Investigation and analysis of soil properties of Weidong New City based on sponge city[J]. *Land Development and Engineering Research*, 2018, 3(7): 20-25. (in Chinese))
- [25] 高二鹏. 不同植被边坡糙率研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014. (GAO E P. Research on Manning coefficient of different vegetated slope[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014. (in Chinese))
- [26] 郭雨华, 赵廷宁, 孙保平, 等. 草地坡面水动力学特性及其阻延地表径流机制研究[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(4): 264-267. (GUO Y H, ZHAO T N, SUN B P, et al. Study on the dynamic characteristics of overland flow and resistance to overland flow of grass slope [J]. *Research of Soil and Water Conservation* 2006, 13(4): 264-267. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-3409.2006.04.083.
- [27] 李贵玉. 黄土丘陵区不同土地利用类型下土壤入渗性能对比研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007. (LI G Y. Rainfall infiltration simulation and numerical computation at different land use on the loessial hillslope[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2007. (in Chinese))
- [28] 刘贤赵, 康绍忠. 连续与间歇积水入渗对比试验研究[J]. *水科学进展*, 1999, 10(1): 54-59. (LIU X Z, KANG S Z. Contrast experimental research on continuous and intermittent infiltration under ponded conditions[J]. *Advances in Water Science*, 1999, 10(1): 54-59. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.1999.01.010.
- [29] 李世豪. 郑州市区洪涝风险分析及内涝积水模拟研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016. (LI S H. Analysis floods risk and study waterlogging simulation in Zhengzhou [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016. (in Chinese))