

产流模式空间分布对城市雨洪过程模拟的影响

刘成帅,许莹莹,孙悦,赵晨晨,解添宁,李文忠,胡彩虹

(郑州大学水利与交通学院,河南 郑州 450001)

摘要:通过耦合网格产流计算模型(GRGM)和暴雨洪水管理模型(SWMM)汇流计算模块构建了GRGM-SWMM模型。以贾鲁河中牟水文站控制流域(包括郑州市中心城区)为研究区,基于18场实测暴雨洪水资料探究了产流模式空间分布对洪水过程模拟精度的影响。结果表明:研究区超渗产流模式空间分布面积占比高达72%,城市下垫面仍以超渗产流模式为主;相较于仅考虑超渗产流计算的SWMM,考虑超渗、蓄满和混合等不同产流模式空间分布的GRGM-SWMM模型场次洪水产流量、流量过程模拟精度明显提高,产流量模拟相对误差平均降低33.26%、决定系数平均提高0.089,流量过程模拟均方根误差平均降低5.13 m³/s、纳什效率系数和决定系数分别平均提高0.227、0.207。

关键词:城市雨洪过程模拟;产流模式;SWMM;GRGM-SWMM;郑州市

中图分类号:TU992

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)02-0028-07

Effect of spatial distribution of runoff generation patterns on urban storm flood process simulation //LIU Chengshuai, XU Yingying, SUN Yue, ZHAO Chencheng, XIE Tianning, LI Wenzhong, HU Caihong (School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The GRGM-SWMM model was constructed by coupling the grid runoff generation model (GRGM) and the rainstorm flood management model (SWMM). Taking the control basin of Zhongmou Hydrological Station on the Jialu River (including the central urban area of Zhengzhou City) as the study area, based on 18 measured rainstorm and flood data, the impact of spatial distribution of runoff generation modes on the accuracy of flood process simulation was explored. The results show that the spatial distribution of the infiltration-excess runoff generation pattern in the study area accounts for up to 72%, and the urban underlying surface is still dominated by the infiltration-excess runoff generation pattern. Compared to the SWMM that only considers the infiltration-excess runoff generation for runoff calculations, the GRGM-SWMM model, which considers different runoff generation patterns such as infiltration, saturation, and mixing, significantly improves the accuracy of peak flood discharge and flow process simulation. The relative error of runoff generation decreased by an average of 33.26%, and the determination coefficient increased by an average of 0.089. The root mean square error of simulated discharge also decreased by an average of 5.13 m³/s, while the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient and the determination coefficient increased by an average of 0.227 and 0.207, respectively.

Key words: urban storm flood process simulation; runoff generation pattern; SWMM; GRGM-SWMM; Zhengzhou City

据水利部的《中国水旱灾害公报》统计数据显示,1950—2021年全国洪涝灾害受灾面积约为68 117万hm²,导致死亡总人口约28万人、倒塌房屋约12 281万间,直接经济损失超过2 000亿元^[1]。近年来,由突发性大暴雨引发的城市洪涝灾害日趋严峻^[2-3],严重威胁着城市公共基础设施和居民的生命财产安全,城市洪水预报预警也显得愈发重要^[4-5]。

自20世纪70年代起,暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)、城市综合流域排水(integrated catchment management, ICM)模型、MIKE Urban以及一些自研水文水动力耦合模型等相继产生并被广泛应用^[6-8]。其中SWMM因其代码开源、计算稳定、便于操作和二次开发等优点成为代表性模型之一^[9-10]。产流计算决定洪水水量,是提高模型模拟精度的关键,SWMM提供的产流计算

基金项目:国家自然科学基金项目(51979250, U2243219)

作者简介:刘成帅(1996—),男,博士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:liucs@gs.zzu.edu.cn

通信作者:胡彩虹(1968—),女,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:hucaihong@zzu.edu.cn

方法主要有 Horton 法、Green-Ampt 法和 SCS-CN 法等^[11]。由于考虑城市地区显著的不透水性特征^[12-13],目前在霍顿超渗产流理论范畴内通过优选或改进产流计算方法提高 SWMM 洪水模拟精度的研究较多^[14-15],鲜有从基本径流成分出发考虑产流模式空间分布对城市雨洪过程模拟精度影响的相关报道。随着我国老城改造和海绵城市建设的持续推进,城市可透水面有一定程度增加^[16],仅考虑超渗产流模式的计算方法并不能完全反映城市地区复杂下垫面的产流过程,极大可能增加了 SWMM 洪水过程模拟的不确定性误差^[4]。超渗产流、蓄满产流和混合产流被认为是 3 种基本产流模式^[17],考虑产流模式空间分布对区域洪水模拟的影响,首先需要进行空间产流模式辨析^[18]。土壤类型、土地利用和地形坡度是影响 3 种产流模式的重要下垫面因素^[19-20],因此,如何根据城市复杂下垫面属性辨析 SWMM 子汇水区网格的产流模式,并进行雨洪数值模拟是亟须解决的科学问题。

郑州市是洪涝灾害频发的代表性城市之一,位于贾鲁河中牟站控制流域内。2021 年郑州“7·20”特大暴雨造成 292 人遇难,47 人失踪,直接经济损失达 532 亿元,在中国自然灾害史上极为罕见。本文以贾鲁河中牟县水文站控制流域为研究区,分级叠加下垫面的土壤类型、土地利用类型、地形坡度空间分布属性。在辨析子汇水区网格产流模式的基础上改进 SWMM 模型产流计算模块,将网格产流计算模型(grid-based runoff generation model, GRGM)与 SWMM 耦合为 GRGM-SWMM 模型,并基于 18 场实测降雨径流数据检验模型的适用性,以期为郑州市防洪预警及决策提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

贾鲁河是郑州市骨干排水河道,发源于郑州新密市,从中牟县流出郑州市。贾鲁河中牟站控制流域面积 2 106 km²,其中郑州市中心城区(即二七、中

原、金水、管城、惠济 5 个区域,总面积 1 010.3 km²)占研究区的 47.97%,地理位置处于 112°42'E ~ 114°14'E,36°16'N ~ 34°58'N 之间,如图 1 所示。研究区地形西南高、东北低,属丘陵山区向平原过渡地带,易发生外洪内涝并发灾害,平均每年经济损失超过 2 亿元^[21]。

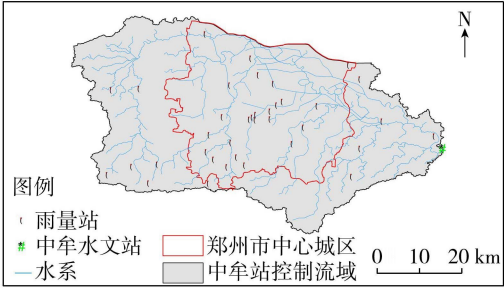


图 1 研究区概况及雨量站分布

Fig.1 Overview of study area and distribution of rainfall stations

1.2 下垫面数据

研究区土壤类型数据源自世界土壤数据库,分为壤质砂土、砂壤土、粉砂壤土和壤土 4 类,如图 2(a)所示,考虑砂壤土和粉砂壤土透水性相近,在产流辨析时归为一类。卫星遥感影像采用了美国 Sentinel 系列遥感影像,空间分辨率为 10 m,经 ENVI 软件解译得到土地利用类型数据,如图 2(b)所示,其中建筑用地占比最高,为 44.5%。坡度是利用 GIS 技术对 DEM 进行提取而得,如图 2(c)所示。DEM 源自地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),原始空间分辨率为 30 m。分别使用 GIS 最邻近分配、执行双线性插值方法将土壤类型、坡度重采样至 10 m×10 m 的网格单元,遵循易发生产流模式辨析框架,叠加属性确定网格单元易发生产流模式。

1.3 降雨径流数据

18 场洪水的降雨数据源自研究区 37 个雨量站,流量数据源自中牟水文站,时段间隔均插值为 1 h。降雨数据作为输入驱动 SWMM 和 GRGM-SWMM 模型,对应流量数据用于模型率定和验证。

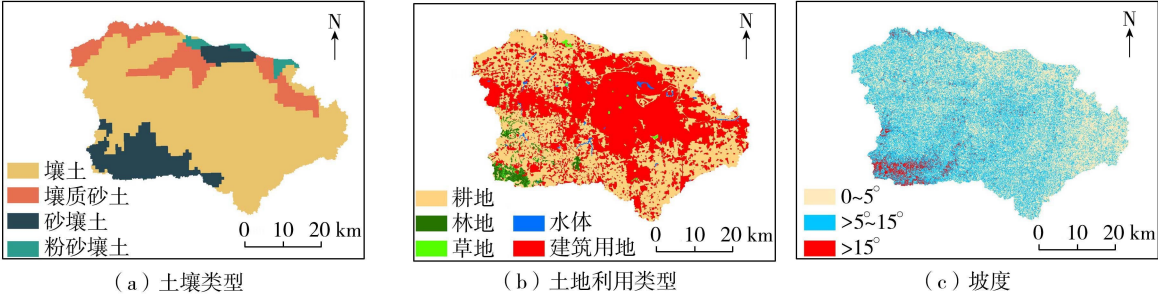


图 2 研究区下垫面特征属性空间分布

Fig.2 Spatial distribution of characteristic attributes of underlying surface in study area

2 研究方法

2.1 产流模式辨析方法

产流是指降水量扣除损失形成净雨的过程,产流量是指降雨形成径流的那部分水量^[22-23]。在洪水事件中,通常将超渗地面径流 R_s 、饱和地面径流 R_{sat} 、壤中流 R_{int} 、地下径流 R_g 等 4 种基本径流成分组合为 R_s+R_g 、 R_g 、 $R_s+R_{int}+R_g$ 、 $R_{sat}+R_{int}+R_g$ 、 $R_{int}+R_g$ 、 R_s 、 R_s+R_{int} 、 $R_{sat}+R_{int}$ 、 R_{int} 等 9 种产流类型^[15-16]。一般认为, R_s+R_g 、 R_g 、 $R_{int}+R_g$ 、 $R_s+R_{int}+R_g$ 和 $R_{sat}+R_{int}+R_g$ 属于蓄满产流模式; R_s 、 R_s+R_{int} 、 $R_{sat}+R_{int}$ 、 R_{int} 属于超渗产流模式; 由于下垫面条件及降雨时空分布的复杂性所导致超渗和蓄满两种产流模式相互交织在一起的特殊模式为混合产流模式, 倾向于在半干旱半湿润过渡地区产生^[20,24]。本文提出“土壤类型-土地利用-地形坡度”易发生产流模式辨析框架, 如图 3 所示。土壤类型按照透水性分为壤质砂土、砂壤土和粉砂壤土、壤土 3 类; 土地利用分为水体、建筑用地、耕地、林地和草地 5 类, 城区的建筑、道路、硬质广场等都归于建筑用地, 建筑用地和水体属于易发生超渗产流模式区域; 地形坡度分为 $0 \sim 5^\circ$ 、 $5^\circ \sim 15^\circ$ 和 $>15^\circ$ ^[25], 分别记为 I、II 和 III 类坡度。

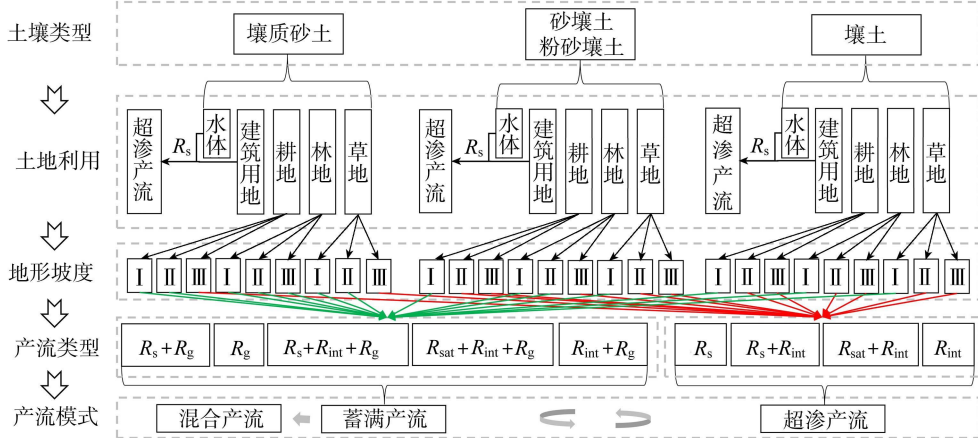


图 3 易发生产流模式辨析框架

Fig. 3 Framework for discriminating easily occurring runoff generation patterns

2.2 GRGM-SWMM 模型

图 4 为 GRGM-SWMM 模型结构, P_{mi} 、 R_{mi} 分别为第 m 个网格 t 时刻的降水量、产流量, Q_t 为流域出口断面 t 时刻的流量。GRGM-SWMM 模型实质是改进了产流计算模块的 SWMM 模型, 包括子汇水区 GRGM 模型和 SWMM 汇流模块两部分。GRGM 模型集成了超渗产流、蓄满产流和混合产流 3 种产流计算模式, 分别用霍顿下渗 (Horton infiltration, HI) 曲线、抛物线型蓄水容量曲线和蓄满-超渗兼容曲线来计算 3 种模式主导的子汇水区网格产流过程。汇流计算是洪水水量在特定时空的分配过程, 决定了洪水的演算路径, 并不涉及洪水水量的损失, 故汇流计算仍使用 SWMM 原有模块, 其原理是分别使用非线性水库法和一维圣维南方程组进行地表汇流和管网(河道)汇流计算。

2.2.1 GRGM 模型计算原理

a. 超渗产流计算。Horton 产流理论较为适用于城镇化程度较高的区域^[6], 其控制方程为霍顿下渗公式^[10]:

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \tag{1}$$

式中: f_t 为 t 时刻的下渗率; f_c 为最小下渗率; f_0 为最大下渗率; k 为下渗衰减系数。

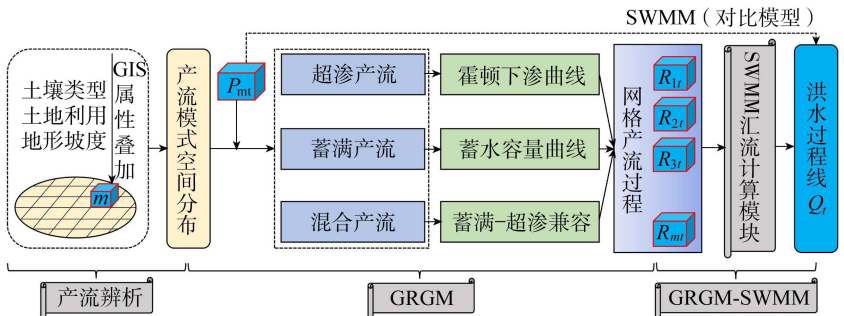


图 4 GRGM-SWMM 模型结构

Fig. 4 GRGM-SWMM structure

b. 蓄满产流计算。蓄满产流选用适合闭合流域的抛物线型流域蓄水容量分配曲线^[26]：

$$a = 1 - \left(1 - \frac{W}{W_{\max}}\right)^n \quad (2)$$

式中： a 为蓄水容量分配曲线中不高于某一蓄水容量的累计面积占流域面积的比例； W 为点蓄水容量； $W_{\max}$ 为最大点蓄水容量； n 为经验参数。

c. 混合产流计算。混合产流是通过耦合蓄满和超渗两种基本模式进一步发展的理论,这里选用蓄满-超渗兼容计算模型,具体方法见文献[20]。

2.2.2 SWMM 汇流模块计算原理

地表汇流采用非线性水库法,其水量平衡方程可用如下的偏微分方程表示：

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q \quad (3)$$

式中： d 为地表积水深度； i 为降水强度； e 为地表蒸发率； f 为下渗率； q 为地表径流率。

管道(河道)汇流过程采用动力波法控制的圣维南方程组^[8]：

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \\ gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial (Q^2/A)}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中： Q 为流量； A 为过水断面面积； H 为水深； g 为重力加速度； S_f 为摩阻比降。

2.3 子汇水区概化处理

因研究区面积较大,难以准确模拟中心城区各个排水片区的径流过程,故在中心城区只概化排水干管,如图 5(a)所示。考虑到中心城区排水管网的密集性和排水系统的复杂性,在子汇水区划分时对其进行加密处理。首先以道路、排水管网为骨架,按照中心城区地形汇流特征划分子汇水区,子汇水区数目通常为 0.6 ~ 1.4 倍区间的节点和管段数量^[27-28],概化为 3 359 个子汇水区、2 435 个排水节点、2 659 条管段；其次结合研究区地形和水文特征,将排水系统共概化为 4 000 个由河道和排水管网共同控制的子汇水区,如图 5(b)所示；最后利用 GIS 技术叠加 10×10 m 易发生产流模式网格图层,在子汇水区尺度上确定产流计算模式。

2.4 模型精度评价

选取径流深相对误差 r 、决定系数 R^2 对 GRGM 模型精度进行评价；选取洪水流量均方根误差 (root mean squared error, RMSE)、纳什效率系数 (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE)、 R^2 对 SWMM 和 GRGM-SWMM 模型进行精度评价^[29-31]。其中, NSE

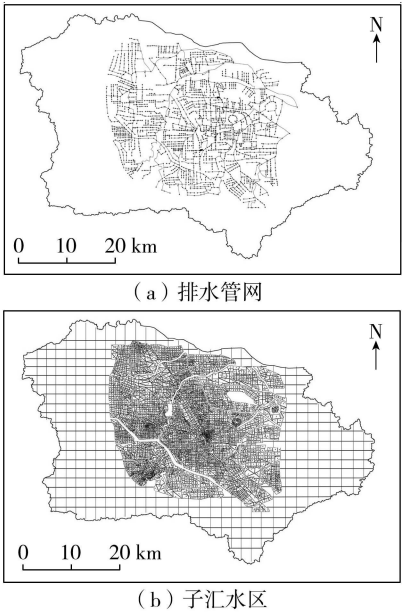


图 5 研究区排水管网和子汇水区概化结果
Fig. 5 Schematic results of rainwater pipeline network and sub-catchment area in study area

取值范围 $(-\infty, 1]$, 越接近 1, 模拟效果越好。

3 结果与分析

3.1 易发生产流模式空间分布

基于产流模式辨析框架,划分研究区的主导产流模式空间分布如图 6 所示。研究区易发生超渗产流模式网格占比最多,高达 72%,主要集中在中心城区和地形坡度较大的地区；易发生混合产流模式网格占比为 19%；易发生蓄满产流模式网格占比最少,仅为 9%。研究区属于平原地区,地势较为平坦,地下水位较高,地下渗透能力强。此外,研究区包括郑州中心城区,下垫面多为硬化地表,不利于地表水的渗透,因此容易形成超渗产流。混合产流和蓄满产流占比相对较少,共计 28%,多发生在靠近河道的透水区域,以及一些块状自然覆盖或人工生态修复措施存在的地区。

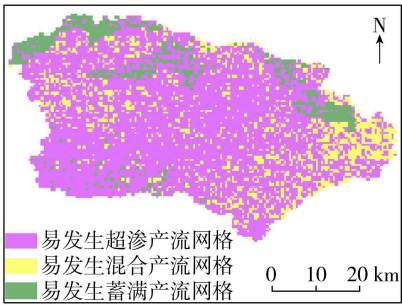


图 6 易发生产流模式空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of easily occurring runoff generation patterns

3.2 参数率定与验证

使用 9 场次实测暴雨洪水过程对 SWMM 和 GRGM-SWMM 模型进行参数率定,包括 20160522、20160605、20160614、20160709、20160715、20160718、20170604、20170705 和 20170729 号洪水,定义洪号为 1~9;使用 9 场次实测暴雨洪水过程进行验证,包括 20170801、20170812、20170818、20170825、20170829、20190605、20190801、20190806 和 20190809 号洪水,定义洪号为 10~18。SWMM 需要率定的参数包括不透水区注蓄量、透水区注蓄量、不透水区曼宁系数、透水区曼宁系数、最大入渗率、最小入渗率、衰减系数和管道/河道曼宁系数,率定值分别为 7.39 mm、12.06 mm、0.14、0.28、80.32 mm/h、11.35 mm/h、6.63 h⁻¹和 0.014;GRGM-SWMM 模型产流模块参数包括流域上层蓄水容量、流域下层蓄水容量、蒸发折算系数、流域蓄水容量、蓄水容量曲线经验性指数、最大入渗率、最小入渗率、衰减系数和渗透系数,率定值分别为 15.64 mm、75.36 mm、1.41、162.3 mm、0.31、80.32 mm/h、11.35 mm/h、6.63 h⁻¹和 0.25;GRGM-SWMM 模型汇流模块参数包括超渗产流网格不透水区曼宁系数、混合产流网格不透水区曼宁系数、蓄满产流网格不透水区曼宁系数、超渗产流网格透水区曼宁系数、混合产流网格透水区曼宁系数、蓄满产流网格透水区曼宁系数和管道/河道曼宁系数,率定值分别为 0.01、0.15、0.40、0.16、0.46、0.71 和 0.014。可以看出,不透水区曼宁系数和透水区曼宁系数这两个汇流参数在不同产流模式主导的子汇水区网格中取值不一样。这是因为不同产流模式主导的子汇水区网格对应着不同的土壤类型、土地利用和地形坡度等下垫面属性叠加特征,故地表对水流的阻力有所差异,这与付潇然等^[32]在大尺度无管流数据城区 SWMM 构建及模拟研究中应根据不同土地利用类型进行参数校准的结论一致。

3.3 产流计算

GRGM 模型和 HI 模式的产流计算结果如图 7 所示。由图 7(a)可见,GRGM 模型和 HI 模式计算的 18 场次洪水产流量 r 最大值分别为 15.27%、78.60%,最小值分别为 6.32%、3.31%,平均值分别为 41.67%、8.41%。GRGM 模型计算结果中有 13 场洪水的 r 在 10% 以内,其余 5 场洪水的 r 为 10%~20%,故认为 GRGM 模型计算结果比较可靠。由图 7(b)可见,GRGM 模型计算径流深和实际径流深的散点值集中在 45°线附近, R^2 值高达 0.976;HI 模式计算径流深和实际径流深的散点值主要分布在 45°线上方, R^2 值为 0.887,计算产流量

整体偏大。GRGM 模型相较 HI 模式的 r 平均降低 33.26%、 R^2 平均提高 0.089,故认为考虑不同产流模式空间分布的 GRGM 模型计算产流比仅考虑超渗模式的产流计算更为准确。

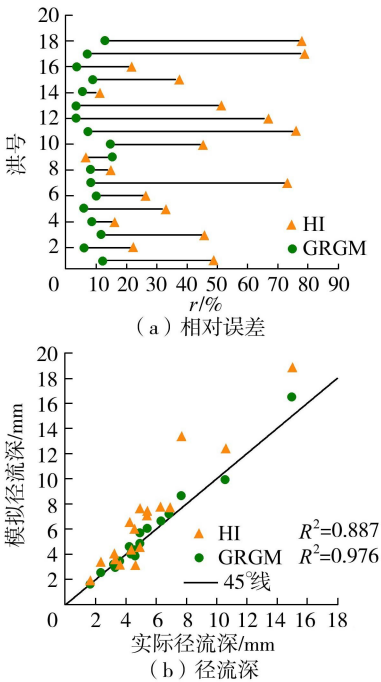


图 7 GRGM 模型和 HI 模式模拟结果
Fig.7 Simulation results of GRGM and HI model

3.4 洪水过程模拟

使用 GRGM-SWMM 模型和 SWMM 对 18 场洪水过程模拟,模拟结果和评价指标统计分别见图 8 和表 1。模型参数在 18 场次洪水中均保持一致,故将率定期和验证期的模拟结果统一分析。由图 8(a)可见,GRGM-SWMM 模型和 SWMM 模拟洪水流量过程与实测流量较为吻合,基本能反映实际降雨径流过程。但 SWMM 在洪水流量较大的情况下存在高估洪峰的现象,这在 20160718、20190605、20190801 和 20190809 场次洪水模拟中表现比较明显。由图 8(b)可见,GRGM-SWMM 散点值均分布在 45°线附近,相关程度较高;SWMM 散点值较多分布在 45°线上方,说明整体流量模拟偏大,这与前面 HI 模式计算的产流量整体偏大相呼应。

由表 1 可见,GRGM-SWMM 模型的 18 场降雨洪水模拟结果的 R^2 值中有 11 场次超过 0.9,其余 7 场次均超过 0.8, RMSE 值有 15 场次低于 10 m³/s,仅有 3 场次超过 10 m³/s;NSE 值有 5 场次超过 0.9,10 场次超过 0.8,仅有 1 场次低于 0.7。故认为 GRGM-SWMM 模型模拟结果相对准确可靠;SWMM 的 18 场降雨径流模拟结果的 R^2 值仅有 7 场次超过 0.7;RMSE 值有 11 场次超过 10 m³/s;NSE 值仅有 3 场次超过 0.7。GRGM-SWMM 模型和 SWMM 的

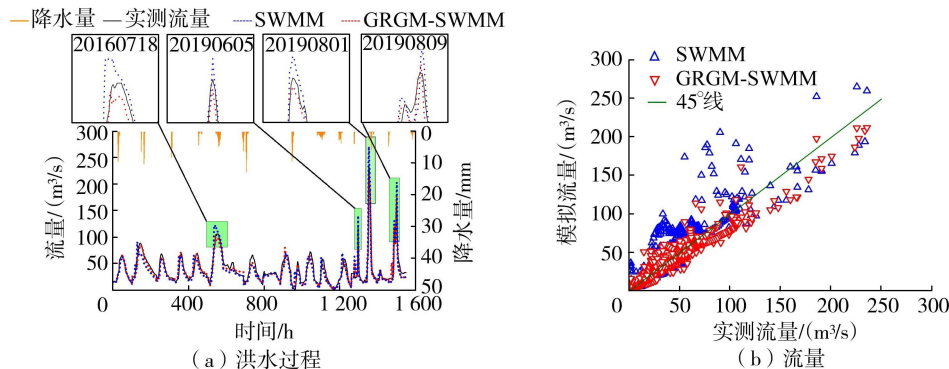


图8 GRGM-SWMM 和 SWMM 模型洪水过程模拟结果

Fig.8 GRGM-SWMM and SWMM flood process simulation results

表1 GRGM-SWMM 和 SWMM 模型评价指标统计

Table 1 Statistics of evaluation indicators for GRGM-SWMM and SWMM

时期	洪号	RMSE/(m^3/s)		NSE		R^2	
		GRGM-SWMM	SWMM	GRGM-SWMM	SWMM	GRGM-SWMM	SWMM
率定	1	7.808	11.165	0.819	0.629	0.972	0.785
	2	0.905	0.777	0.951	0.669	0.960	0.804
	3	0.930	0.847	0.865	0.604	0.908	0.533
	4	5.790	8.624	0.885	0.745	0.905	0.777
	5	4.356	10.099	0.927	0.608	0.951	0.669
	6	10.023	14.877	0.850	0.670	0.923	0.759
	7	2.647	2.436	0.559	0.627	0.847	0.833
	8	7.758	10.861	0.878	0.760	0.930	0.847
	9	9.943	18.892	0.856	0.480	0.865	0.604
验证	10	7.132	8.320	0.698	0.589	0.836	0.795
	11	5.300	12.719	0.910	0.484	0.928	0.487
	12	4.933	15.175	0.944	0.472	0.970	0.645
	13	5.986	9.399	0.889	0.726	0.958	0.798
	14	7.541	10.558	0.816	0.640	0.835	0.712
	15	8.081	14.205	0.762	0.542	0.859	0.554
	16	17.364	41.080	0.926	0.666	0.952	0.667
	17	2.195	3.585	0.844	0.584	0.864	0.680
	18	17.151	24.606	0.816	0.622	0.863	0.654
平均值		6.990	12.120	0.844	0.617	0.907	0.700

RMSE、NSE、 R^2 的平均值分别为 $6.99 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 0.844 、 0.907 和 $12.12 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 0.617 、 0.700 ，GRGM-SWMM 模型的平均 RMSE 比 SWMM 降低 $5.13 \text{ m}^3/\text{s}$ ，NSE 和 R^2 值分别提高 0.227 、 0.207 。这表明在降雨径流过程的模拟中 GRGM-SWMM 模型比 SWMM 具有更好的适用性，模拟精度较高。

4 结 论

a. 研究区易发生超渗产流模式网格占比高达 72% ，易发生混合产流模式占比为 19% ，易发生蓄满产流模式占比仅为 9% ；城市仍以超渗产流模式为主，混合产流和蓄满产流多发生在靠近河道的透水区域以及一些块状自然覆盖或人工生态修复措施存在的地区。

b. GRGM 模型和 HI 模式计算的 18 场次洪水产流量 r 平均值分别 41.67% 和 8.41% ， R^2 平均值

分别为 0.976 和 0.887 ；GRGM 模型产流计算 r 值平均降低 33.26% 、 R^2 平均提高 0.089 ，说明考虑易发生产流模式空间分布比仅考虑超渗模式的产流计算更为准确。

c. 较于 SWMM 模型，GRGM-SWMM 模型模拟 18 场次洪水的 RMSE 平均降低 $5.13 \text{ m}^3/\text{s}$ ，NSE 和 R^2 值分别提高 0.227 、 0.207 。故认为在降雨径流过程的模拟中 GRGM-SWMM 模型比 SWMM 具有更好的适用性，说明通过改进产流计算能提高洪水模拟预报精度。

参考文献：

- [1] 周宏,刘俊,丁华凯,等. 城市有效不透水下垫面及其识别研究进展[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 39-48.
(ZHOU Hong, LIU Jun, DING Huakai, et al. Research progress on urban effective impervious surface and its

- identification[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6):39-48. (in Chinese))
- [2] 刘成帅,韩臻悦,李想,等. 基于 BIC-KMeans 和 SWMM 的城市雨洪快速模拟方法[J]. 水资源保护, 2023, 39(5):79-87. (LIU Chengshuai, HAN Zhenyue, LI Xiang, et al. Urban rainstorm flood rapid simulation method based on BIC-KMeans and SWMM [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5):79-87. (in Chinese))
- [3] 胡彩虹,姚依晨,刘成帅,等. 降雨雨型对城市内涝的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38(6):15-21. (HU Caihong, YAO Yichen, LIU Chengshuai, et al. Effects of rainfall patterns on urban waterlogging [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6):15-21. (in Chinese))
- [4] SUN Yue, LIU Chengshuai, DU Xian, et al. Urban storm flood simulation using improved SWMM based on K-means clustering of parameter samples[J]. Journal of Flood Risk Management, 2022, 15(4):e12826.
- [5] 牛玉国,张金鹏. 构建黄河大水网促进黄河流域生态保护和高质量发展[J]. 水利经济, 2023, 41(2):1-4. (NIU Yuguo, ZHANG Jinpeng. Research on building the Yellow River's large water network and promoting the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(2):1-4. (in Chinese))
- [6] 王京晶,徐宗学,赵刚,等. 基流分割对城市雨洪模拟不确定性分析的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38(5):65-71. (WANG Jingjing, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Impact of baseflow separation on uncertainty analysis of urban storm water simulation [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5):65-71. (in Chinese))
- [7] 傅春,付耀宗,肖存艳,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1):33-39. (FU Chun, FU Yaozong, XIAO Cunyan, et al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD model in Yingtan City[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1):33-39. (in Chinese))
- [8] 郭元,王路瑶,陈能志,等. 极端降雨下的城市地表-地下空间洪涝过程模拟[J]. 水科学进展, 2023, 34(2):209-217. (GUO Yuan, WANG Luyao, CHEN Nengzhi, et al. Simulation of the flood process in urban surface-underground space under extreme rainfall[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(2):209-217. (in Chinese))
- [9] 于磊,黄瑞晶,李容,等. 基于河道纳污能力的北运河城市副中心段合流制溢流污染控制研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5):41-48. (YU Lei, HUANG Ruijing, LI Rong, et al. Research on pollution control of combined sewer overflow in Beijing Municipal Administrative Center section of North Canal based on the ability to decontamination of the river [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(5):41-48. (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] 王小杰,夏军强,董柏良,等. 基于汇水区分级划分的城市洪涝模拟[J]. 水科学进展, 2022, 33(2):196-207. (WANG Xiaojie, XIA Junqiang, DONG Bailiang, et al. Simulation of urban flood using the SWMM with the hierarchical catchment partition method [J]. Advances in Water Science, 2022, 33(2):196-207. (in Chinese))
- [12] 梅超,石虹远,李瑞栋,等. 基于数值试验的降雨径流过程对不透水面空间分布的响应分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(1):86-92. (MEI Chao, SHI Hongyuan, LI Ruidong, et al. Response analysis of rainfall-runoff process to spatial distribution of impervious area based on numerical experiments [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1):86-92. (in Chinese))
- [13] LI Guo, ZHAO Huadong, LIU Chengshuai, et al. City flood disaster scenario simulation based on 1D-2D coupled rain-flood model[J]. Water, 2022, 14(21):21.
- [14] 高希超,王浩,杨志勇,等. 考虑风场影响的城市建筑区产流计算方法[J]. 水科学进展, 2023, 34(1):88-101. (GAO Xichao, WANG Hao, YANG Zhiyong, et al. Runoff calculation method of urban built-up areas considering the impact of wind [J]. Advances in Water Science, 2023, 34(1):88-101. (in Chinese))
- [15] 周宏,刘俊,高成,等. 考虑有效不透水下垫面的城市雨洪模拟模型: I. 模型原理与模型构建[J]. 水科学进展, 2022, 33(3):474-484. (ZHOU Hong, LIU Jun, GAO Cheng, et al. Development of an urban stormwater model considering effective impervious surface: I. theory and development of model [J]. Advances in Water Science, 2022, 33(3):474-484. (in Chinese))
- [16] LIU Xiaoping, HUANG Yinghuai, XU Xiaocong, et al. High-spatiotemporal-resolution mapping of global urban change from 1985 to 2015 [J]. Nature Sustainability, 2020, 3(7):564-570.
- [17] 胡彩虹,张力,鄢强,等. 下垫面变化条件下孤山川流域产流模式辨析研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(3):620-631. (HU Caihong, ZHANG Li, WU Qiang, et al. Discrimination and analysis of runoff generation pattern in gushanchuan basin under the condition of underlying surface change [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(3):620-631. (in Chinese))

(下转第 116 页)

孙昊,陈求稳,丁珏,等. 基于 EFDC 模型的太湖微塑料迁移规律及污染概率分布模拟[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 169-177. (SUN Hao, CHEN Qiwen, DING Jue, et al. Simulation of microplastic migration regularity and pollution probability distribution in Taihu Lake based on

[69] 王旭. 大辽河入海微塑料分布特征、来源及通量研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.

[70] 李常军. 中国南海和东印度洋水体微塑料赋存、源汇和生态风险的研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2022.

(收稿日期: 2023-07-11 编辑: 施业)

(上接第 34 页)

[19] 胡彩虹,冉广,荐圣淇. 佳芦河流域林草覆被变化对产流机制的影响[J]. 水土保持学报,2020,34(2):36-42. (HU Caihong, RAN Guang, JIAN Shenqi. Effect of forest and grass cover change on runoff mechanism in Jialu river basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34 (2):36-42. (in Chinese))

[21] 胡彩虹,刘成帅,李想,等.郑州市雨岛效应多方法集成评估及量化研究[J]. 水资源保护,2023,39(2):152-159. (HU Caihong, LIU Chengshuai, LI Xiang, et al. Multi-method integrated evaluation and quantitative study of rain island effect in Zhengzhou City [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (2): 152-159. (in Chinese))

[23] 芮孝芳. 基于径流形成原理的若干洪水预报理论述评 [J]. 水科学进展, 1992, 3(3): 233-240. (RUI Xiaofang. Reviews of flood forecasting theory based on runoff formation principle[J]. Advances in Water Science, 1992, 3(3): 233-240. (in Chinese))

temporal dynamic combination of saturation-excess and infiltration-excess runoff[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(6): 25-32. (in Chinese))

[26] LI Guo, LIU Chengshuai, ZHAO Hudong, et al. Runoff and sediment simulation of terraces and check dams based on underlying surface conditions[J]. Applied Water Science, 2023, 13(1):18.

[28] 杜纤. 基于 SWMM 模型的城市暴雨洪涝精细化模拟研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.

[29] GUPTA H V, KLING H, YILMAZ K K, et al. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling [J]. Journal of Hydrology, 2009, 377 (1/2) :80-91.

[30] 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.

[31] JACKSON E K, RPBERTS W, NELSEN B, et al. Introductory overview: error metrics for hydrologic modelling; a review of common practices and an open source library to facilitate use and adoption [J]. Environmental Modelling & Software, 2019, 119: 32-48.

[32] 付潇然,王东,栾清华,等. 大尺度无管流数据城区SWMM构建及模拟: II. 模型参数校验及暴雨径流模拟分析[J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 51-60. (FU Xiaoran, WANG Dong, LUAN Qinghua, et al. SWMM-based rainfall-runoff simulations in large-scale urban area with no pipeline-flow observations: II. model calibration and analysis of rainfall-runoff simulations[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(1): 51-60. (in Chinese))

• 116 •