

DOI: 10.5846/stxb201601050028

班玉龙,孔繁花,尹海伟,徐文彬,都金康,徐建刚,蒲英霞.土地利用格局对 SWMM 模型汇流模式选择及相应产流特征的影响.生态学报,2016,36(14): - .

Ban Y L, Kong F H, Yin H W, Xu W B, Du J K, Xu J G, Pu Y X. Impacts of land use patterns on the overland flow routing options and simulation outputs of stormwater management models. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(14): - .

土地利用格局对 SWMM 模型汇流模式选择及相应产流特征的影响

班玉龙¹, 孔繁花^{2,*}, 尹海伟¹, 徐文彬¹, 都金康³, 徐建刚¹, 蒲英霞³

1 南京大学城市规划与设计系, 南京 210093

2 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210023

3 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

摘要:城市下垫面土地利用格局与地形的复杂性将导致地表汇流模式的多变性。在城市雨洪管理模型中,不同汇流模式的选取对雨洪模拟结果产生重要影响,而这一影响往往被忽视。本文基于设定的与巴中城市社区尺度相近的实验区以及巴中市的真实降水数据,并根据实验区土地利用格局特征,在 SWMM 雨洪管理模型汇水模块中设置 Outlet、Impervious、Pervious 三种汇流演算模式及其演算面积比,分析了不同土地利用格局响应下的不同汇流模式选择对城市雨洪模拟结果的影响。结果表明:1) Outlet、Impervious 两种汇流演算模式下汇水区地表径流的模拟结果相同,但与 Pervious 演算模式下的模拟结果差异显著。在 Pervious 模式下地表径流相对另外两种汇流模式最大降低了 52%,降雨下渗量提高了近 1 倍。2) 在 Pervious 模式下,演算面积比对汇水区地表径流模拟结果具有重要影响。在总不透水面(IA)面积一定的情况下,有效不透水面(DCIA)的减少引起非有效不透水面(UIA)的比率增加。这种土地利用格局的变化致使汇水区总径流量、径流系数显著下降,降雨下渗量逐渐增加,洪峰流量则呈先增后减的趋势,且在非有效不透水面比率为 30% 和 40% 时(此时非有效不透水面与渗透面面积相接近),洪峰流量最小。对结果的分析表明了雨洪管理模型在小尺度汇水区上应用时,应根据土地利用格局特征选择相应的地表汇流模式。正确的评价和分析不同土地利用格局方案对地表径流的影响,从而更为科学地指导城市雨洪管理和海绵城市的规划与建设。

关键词: SWMM; 地表汇流模式; 有效不透水面(DCIA); 演算面积比; 海绵城市

Impacts of land use patterns on the overland flow routing options and simulation outputs of stormwater management models

BAN Yulong¹, KONG Fanhua^{2,*}, YIN Haiwei¹, XU Wenbin¹, DU Jinkang³, XU Jiangang¹, PU Yingxia³

1 Department of Urban Planning and Design, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2 International Institute for Earth System Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China

3 School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: The patterns and topographic complexity inherent in urban surfaces cause considerable variations in flow paths, and may influence the simulation outputs of urban stormwater management models (SWMMs). However, the influence of these variables in urban storm water management is largely unknown and so it is usually ignored, consequently reducing the accuracy of the simulation results. To examine how patterns of land use and overland flow routing options influence the simulation outputs of the SWMM, we chose an experimental site in Bazhong City. We developed three sub-area overland flow routing methods (outlet, impervious, permeable) for different precipitation intensities and land use patterns within the

基金项目:国家自然科学基金项目(41440006, 51478217, 51278239)

收稿日期:2016-01-05; 修订日期:2016-03-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanhuakong@163.com

sub-catchment area module of the SWMM, and compared the simulation outputs. The results indicated that the simulated surface runoff for the outlet and impervious routing methods were the same, but were considerably different from those for the permeable routing method. Under the permeable routing method, the surface runoff decreased by 52% and the amount of rainfall that permeated almost doubled. The percentage of runoff routed by the permeable routing method had a significant impact on the simulation results. As the percentage of routed runoff increased, the directly connected impervious area (DCIA) gradually decreased and the unconnected impervious area (UIA) gradually increased, which led to a considerable reduction in the total runoff volume and a decrease in the surface runoff coefficient. Simultaneously, the amount of rainfall that permeated gradually increased, but the peak flow rate initially increased and then decreased. When the percentage of routed runoff reached 30 or 40%, the UIA was nearly equal to the permeable surface area, and the peak flow rate was at a minimum. The results from the present study showed that land use patterns and overland flow routing options influenced the SWMM simulation outputs. The results also suggest that for the effective management of urban stormwater, urban land-use patterns and overland flow paths should be optimized at a small scale, as this will reduce the risk of urban stormwater disasters. This approach will support the planning and development of sponge cities.

Key Words: Storm Water Management Model (SWMM); Overland flow routing methods; Directly Connected Impervious Area (DCIA); Percent routed; Sponge city

快速城市化导致自然生态空间向城市空间不断转换,致使原有自然流域下的地表水文效应发生了明显改变,加剧了城市洪涝灾害发生的风险^[1-3]。因而,探寻能够有效降低洪涝灾害风险的新型城市雨洪管理模式就显得尤为重要。城市水文模型能够模拟地形、土壤、用地结构和气象水文等要素的空间变化对水文过程的影响,可为城市雨洪管理提供重要的决策依据^[4,5]。Bosley 应用典型区域对常用的 19 个水文模型进行了敏感性分析,发现 SWMM(Storm water Management Model)是最适合进行不同土地利用格局下雨洪模拟的模型^[6]。该模型是 1971 年由美国环境署开发的一个基于单个降水事件或者长期降水序列的降雨-径流模拟软件,它通过一系列能够接收降水的子流域作为径流或者污染物的来源,能有效进行水文、水力以及水质方面的模拟^[7,8]。目前已被广泛用于城市暴雨径流模拟和排水管道系统、流域规划、水敏性城市设计以及海绵城市建设中^[9-13]。

SWMM 模型,特别是含有低影响开发(Low Impact Development, LID)理念模块后,其在城市雨洪管理中应用更加广泛。在基于 SWMM 模型的城市雨洪模拟研究中,大部分特征参数设置已经较为成熟,例如汇水区面积、非渗透性、坡度、域宽度、渗透面的渗透模式和渗透参数选择以及洼地储水和曼宁系数等参数的选择与设置^[14-18]。但对于汇水区汇流演算模式的选择以及土地利用格局变化对城市雨洪模拟结果影响的研究还比较少。汇流演算模式是雨洪管理模型模拟降水在用地类型复杂的地表产生汇流时的计算方式,选择合理的汇流演算模式可以提高模型模拟结果的精度。SWMM 模型具有三种汇流演算模式,主要通过汇流路径方式(Outlet, Impervious, Pervious)(图 2)和演算面积比(三种汇流方式在汇水区中所占比重)进行设定。Huber 对 SWMM 模型中三种不同汇流模式下的雨洪模拟结果分析发现,Outlet 和 Impervious 汇流模式下汇水区地表径流的模拟结果相同,但相比 Pervious 模式下的模拟结果显著偏大^[19]。赵冬泉分析了汇水区尺度划分和坡度两个因素对汇流模式与模拟结果的影响,结果表明汇水区划分尺度越小,模拟的地表径流会越大;坡度增大会导致三种汇流演算模式下模拟结果的差异缩小^[14]。Earles 提出快速城市化带来的不透水面(Impervious Area, IA)增加是导致城市水文效应发生变化的最主要原因,其中与排水系统直接相连接的不透水面(Directly Connected Impervious Area, DCIA),通常也被称为有效不透水面(Effective Impervious Area, EIA),对城市地表径流的贡献率最大。然而,多数运用 SWMM 模型进行城市雨洪管理的研究缺少对有效不透水面 DCIA 和不透水面 IA 之间的差异进行区别。在模拟时默认模型设置即 Outlet 汇流演算模式,该汇流演算模式将汇水区内的所有不透水面均作为 DCIA,忽略了汇水区土地利用格局的特征以及与排水系统非直接连接的不透水面

积(Unconnected impervious area, UIA)的存在,这往往会导致对地表径流和洪峰流量的高估^[20-22]。

城市用地布局与地形的复杂性将导致地表汇流模式的多样性,这必然导致汇流演算模式的选择会影响城市雨洪管理模型的模拟结果。然而,由于对城市雨洪汇流模式的研究不足,以及目前雨洪管理模型的局限性(SWMM 模型中每个汇水区汇流模式只能选取模型提供的 Outlet、Impervious、Pervious 三种汇流模式中的一种),所以在对城市雨洪管理进行研究时不同汇流模式的选择对模拟结果的影响往往会被忽略。本文基于设定的与巴中城市社区尺度相近的实验区和巴中市的真实降水数据,通过在 SWMM 模型汇水模块中设置不同的汇流演算模式,分析研究了相同汇水区下不同土地利用格局特征对城市雨洪管理的影响。研究结果对我国海绵城市的规划和建设实践具有重要的参考价值和借鉴意义。

1 实验区设定

结合巴中市城市新区社区规模,参照城市规划建设模式及排水单元设计规范,确定了社区尺度上的基本单元实验区(城市支路围合区域),其面积为 6 公顷,长和宽分别为 200 米和 300 米^[24],这一设定也符合城市道路规范中支路网密度要求。同时,根据《城市用地分类与规划建设用地标准》(GB50137-2011),绿地指标参数取上限,综合换算出实验区中渗透面(Pervious Area, PA)比重为 25%(图 1-a)。

本文根据研究需要设定了 12 个用地构成比重一致但土地利用格局不同的汇水区(面积与实验区相同)。根据图 1b 中的计算公式(公式 1)来计算 S1-S10 情景下的 UIA 面积及其比重(图 1c,表 1)。该 10 种情景采用 SWMM 模型中的 Pervious 汇流演算模式(图 2)。S11、S12 情景为参照情景,分别采用 Impervious 和 Outlet 汇流演算模式(图 2)。SWMM 模型汇流演算模式设定后,需要相应设计计算汇水区汇流演算面积比(Percent routed),在模型中其量化方式根据演算模式选择而略有不同。在 Pervious 汇流演算模式下演算面积比为 UIA 占总 IA 的比重(%),但在 Impervious 和 Outlet 模式演算面积比则为 DCIA 占总 IA 的比重%(表 1)。

$$Y=\frac{1}{X}\cdot 15000$$

(1)

X 为实验区渗透面长(m);Y 为实验区渗透面宽(m)。本文 X 值分别取 75、97.5、120、142.5、165、187.5、210、232.5、255、277.5、300。

表 1 实验区设计参数表
Table 1 Parameter values of experimental site

汇水区 sub-catchment	汇流演算模式 Subarea- Routing	面积 Area/hm ²	PA 面积 Pervious area/hm ²	IA 面积 Impervious area/hm ²	DCIA/hm ²	DCIA/IA/%	UIA/hm ²	UIA/IA/%	演算面积比 Percent routed/%
S1	Pervious	6	1.5	4.5	4.05	90	0.45	10	10
S2	Pervious	6	1.5	4.5	3.6	80	0.90	20	20
S3	Pervious	6	1.5	4.5	3.15	70	1.35	30	30
S4	Pervious	6	1.5	4.5	2.7	60	1.80	40	40
S5	Pervious	6	1.5	4.5	2.25	50	2.25	50	50
S6	Pervious	6	1.5	4.5	1.8	40	2.70	60	60
S7	Pervious	6	1.5	4.5	1.35	30	3.15	70	70
S8	Pervious	6	1.5	4.5	0.9	20	3.60	80	80
S9	Pervious	6	1.5	4.5	0.45	10	4.05	90	90
S10	Pervious	6	1.5	4.5	0	0	4.50	100	100
S11	Impervious	6	1.5	4.5	4.5	100	0	0	100
S12	Outlet	6	1.5	4.5	4.5	100	0	0	100

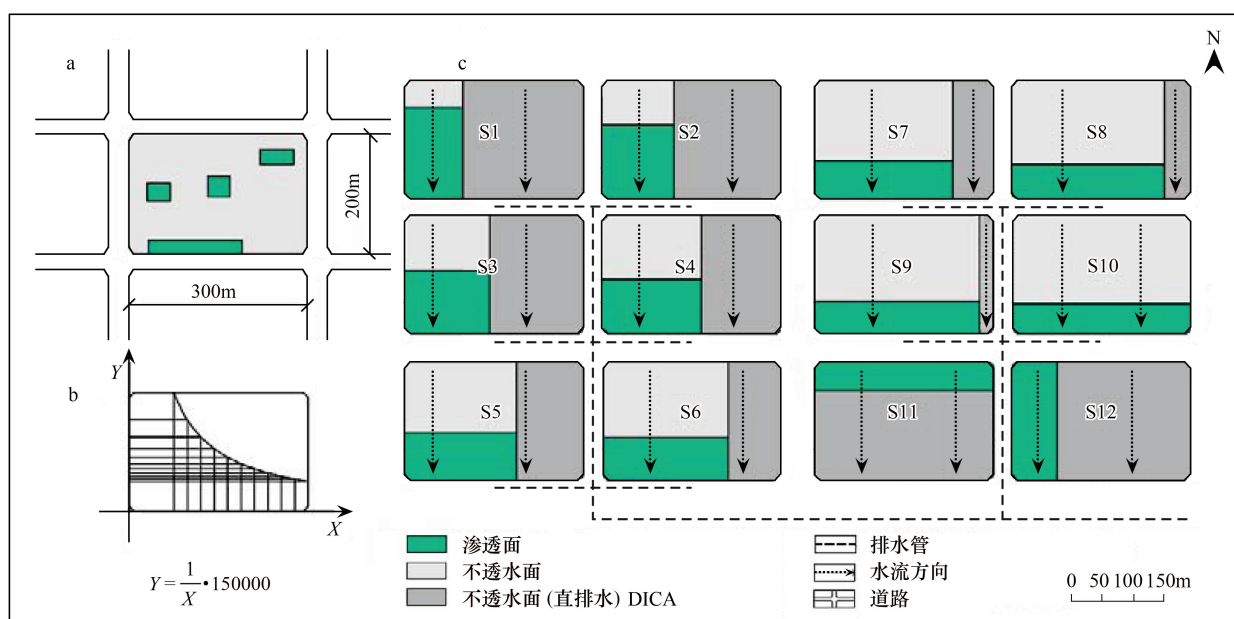


图1 实验场所土地利用组成(a),UIA 构成比重设置(b)和12个土地利用格局不同的地表汇流演算情景

Fig.1 Land use component of experiment site (a), the definition of UIA Percent (b) and the corresponding 12 scenarios under different land use pattern and overland flow routing options (c)

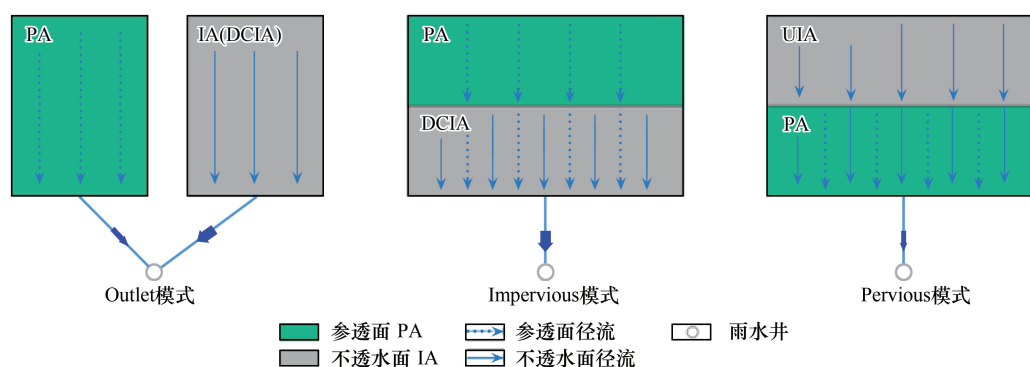


图2 地表汇流演算模式简图(Earles^[20]和Gironás^[23])

Fig.2 The conceptualized sub-area flow routing methods: Outlet, impervious and pervious (revised according to Earles^[20] and Gironás^[23])

2 数据与研究方法

2.1 实验区概化与特征参数设置

为保证变量的唯一性与可比性,避免面积、坡度、流域宽度等参数对雨洪模拟结果的影响,本文将12个汇水区及其管渠的基本物理特征与水文特性参数设置成完全一致(表2)。每个汇水区面积为6公顷、渗透面比重25%、域宽为300米、坡度为1.2%、非渗透性为75%,其他水文特性参数参考模型手册及相关文献使用经验值(表2);每个汇水区设置独立对应的雨水井和排水管路,对应的雨水井和管路参数设置一致(图3)。

2.2 降雨参数的设置

为保证降雨参数数据的真实性与准确性,本文使用巴中市气象局提供的2015年6月23日真实降雨数据(数据采样间隔为10分钟)。本次降雨历时5小时,总降雨量为26.4mm,最大十分钟降雨为4.2mm(图4)。本次降雨事件基本符合巴中市半年期降雨重现期。

表 2 SWMM 模型参数设置表

Table 2 Parameter values used in SWMM

参数名称 Project		单位 Unit	取值 Value	参数取值意义 Value Meaning	参数设置方法 Data Sources
基本物理特征	面积 Area	ha	0.6	汇水区面积	汇水区基本特征提取
	域宽 Width	m	300	汇水区坡面漫流宽度	
	坡度 Slope	%	1.2	汇水区坡度	
	不透水性 Imperv	%	75	汇水区不透水面比重	主要研究变量
	汇流演算模式	Outlet	—	地表径流直排出	
	Subarea-Routing	Impervious	—	地表径流经过不透水面排出	
		Pervious	—	地表径流经过渗透面排出	
	面积演算比 Percent routed	%	10—100	汇水区汇流模式所占比重	管渠基本特征提取
	管渠长度 Pipe length	m	30—260	排水管渠长度	
最大深度 Pipe diameter	m	0.8—1.5	排水管渠直径		
水文特征参数	不透水面曼宁系数 Imp-n	—	0.01	汇水区不透水区曼宁糙率度	模型经验值 Rossman[8], Gironás[23]
	渗透面曼宁系数 Per-n	—	0.1	汇水区渗透区曼宁糙率度	
	不透水面洼地储水 Imp-DS	mm	1.5	汇水区不透水区贮水深度	
	渗透面洼地储水 Per-DS	mm	2.5	汇水区渗透区贮水深度	
	无洼地储水不透水性 Zero-Imp	%	25	汇水区无低洼地不透水区百分比	
	渗入模式 (HORTON)	最大渗入速率 Max. infil. rate	mm/hr	72.4	汇水区土壤最大下渗能力
		最小渗入速率 Min. infil. rate	mm/hr	3.2	汇水区土壤最小下渗能力
		衰减常数 Decay constant	1/hr	1.8	汇水区土壤下渗能力衰减系数
		排干时间 Drying time	day	6	完整饱和土壤到完全排干的时间
		最大容积 Max. infil. vol	mm	0	最大可能渗入容积
	管渠曼宁系数 Con-n	—	0.02	灌渠曼宁糙率度	

2.3 模型模拟与设置参数验证

首先,采用预设的相关参数,采用质量守恒方法(初始蓄水加上总进流量与最终蓄水加上总出流量之间差值的比)验证 SWMM 模型的有效性。当汇水区不透水面分别为 15%、75%和 85%时,实验区模拟结果中各汇水区平均地表径流系数分别为 0.14、0.54 和 0.81,径流量演算的连续误差分别为 0.32%、-0.30%和-0.33%,流量演算的连续误差分别为 1.2%、-0.3%和-0.29%,两者均在±2%以内,处于模型模拟结果连续误差的合理范围内^[23]。然后,采用同样的参数设置,基于 SWMM 模型进行各个单元实验区的地表径流模拟,模拟结果见表 3、4,图 5-6。

3 结果分析

3.1 不同汇流演算模式与土地利用格局下的地表径流变化特征

由表 3 可知,汇水区 S11 和 S12 的地表径流模拟结果(总径流量、洪峰流量和径流系数)相同,表明选择 Outlet 或 Impervious 汇流演算模式对地表径流模拟结果影响相同;在这两种演算模式下,两个汇水区的 IA 全部为 DCIA,因此总渗入量在所有汇水区中最小(6.6mm),仅占降雨量的 25%,总径流量、洪峰流量和径流系数

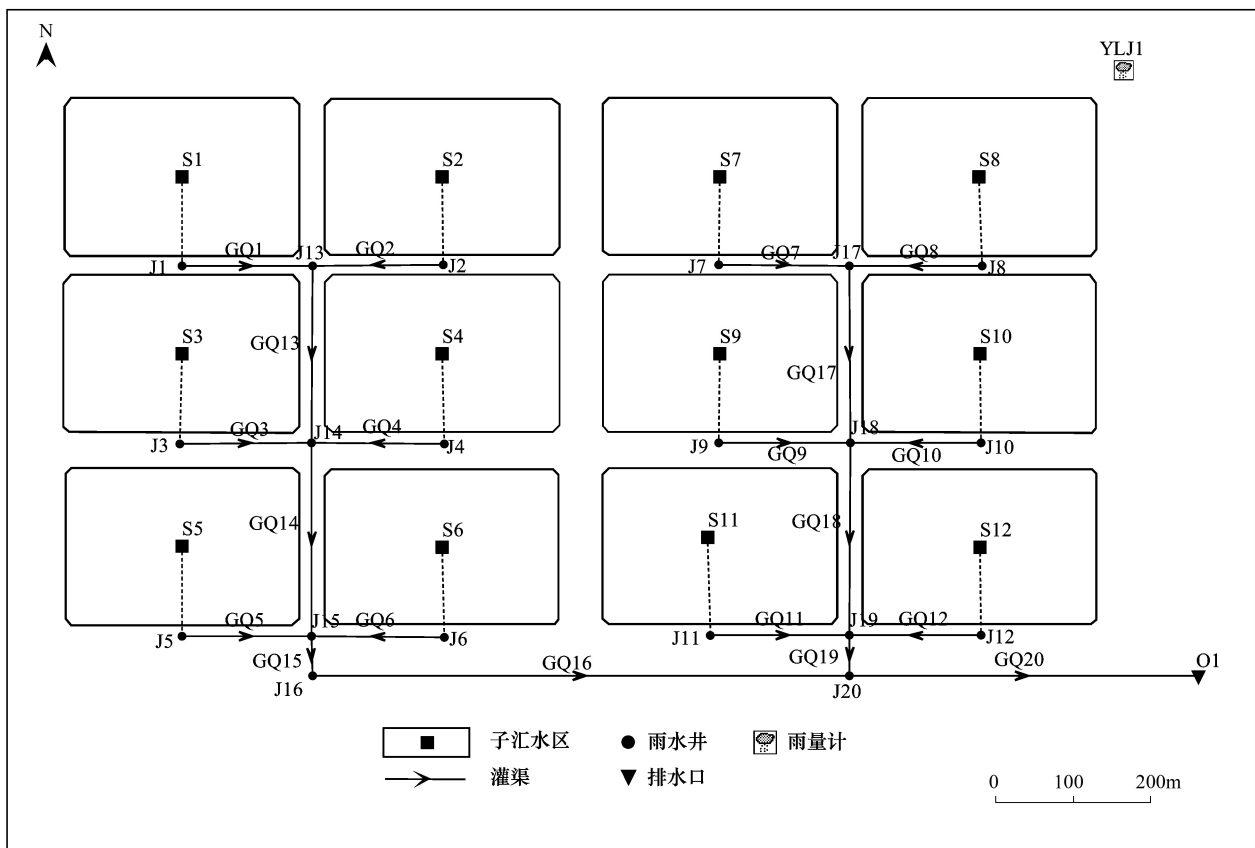


图3 实验区雨洪管理模拟概化图

Fig.3 The conceptualized layout of stormwater conveyance system in each sub-catchments of experimental site

则最大,分别为 $1.14 (10^6 \text{L})$ 、 $0.31 \text{m}^3/\text{s}$ 和 0.72 ;与考虑 UIA 的汇水区 S10 相比, S10 总渗入量提高 99.3% ,总径流量、洪峰流量、径流系数则分别下降了 52.0% 、 3.6% 、 52.4% ,洪峰发生时间也提前了 5 分钟(图 5)。

在汇水区 S1 至 S10 情景中,随着土地利用格局的变化 UIA 占 IA 比重由 10% 上升为 100% (DCIA 占 IA 比重则由 90% 降低到 0%),演算面积比的逐渐升高(由 10% 上升为 100%),使得降雨总渗入量不断增加(由 8.49mm 增至 13.16mm ,约增加了 55%),汇水区地表总径流量和径流系数逐渐下降(分别由 $1.02 (10^6 \text{L})$ 和 0.65 降为 $0.75 (10^6 \text{L})$ 和 0.47 ,约下降了 25% 和 27%),表明不同土地利用格局应选择相应的汇流演算模式,而不同的演算模式对模拟结果具有重要影响。同时,也表明通

过土地利用格局优化能够达到降低地表径流量,增加下渗量的雨洪管理目的。这种雨洪管理效应的变化主要是地表径流从不透水面流进渗透面再汇流到雨水井的过程中,渗透能力较强且未达到饱和的渗透面对从不透水面产生的地表径流进行滞留吸纳渗入,从而提高了整个汇水区的下渗量达到降低了地表径流量的作用。但洪峰流量则先降后增,在演算面积比为 30% 和 40% (UIA 分别为 1.35ha 和 1.8ha ,渗透面 PA 为 1.5ha) 时洪峰流量最小(为 $0.22 \text{m}^3/\text{s}$)。这表明在渗透面 PA 一定量的情况下(本研究为占总面积 25%),当 UIA 和 PA 面积大致相同时,PA 对来自 UIA 的地表径流的吸纳能力相对较强;随后,尽管演算面积和 UIA 都继续增加,

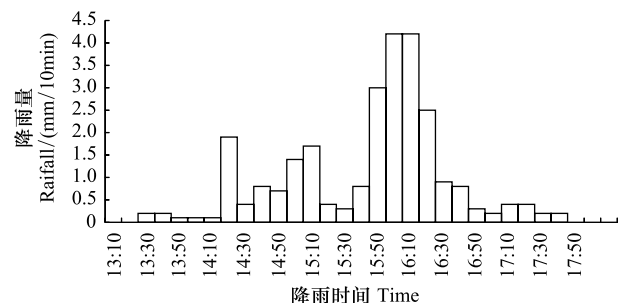


图4 2015年6月23日巴中市降雨强度分布图(数据来源:四川省巴中市气象局)

Fig.4 Distribution of Rainfall intensity from 13:00 to 18:00 on the 23th, June, 2015, in Bazhong (sources: Bazhong Meteorological Bureau, Sichuan Province)

但因为 PA 面积有限,演算面积和 UIA 的增加反而导致地表径流经过 PA 的路径变短,地表径流到达排水口的时间降低,因而 PA 无法有效降低洪峰流量。另外,在降水强度较小时,演算面积比越大的汇水区地表径流产生时间越滞后、产生量越少;但降雨强度变大后,演算面积比越大的汇水区地表径流量则呈现洪峰流量增大、产汇流速度加快的特征(表 3,图 5)。

表 3 各汇水区模拟结果统计表						
Table 3 Variation in surface hydrological characteristics of each designed sub-catchment						
汇水区 sub-catchment	演算面积比 Percent routed/%	总渗入 Rainfall infiltration/mm	总径流 Total flow volume/ (10 ⁶ L)	洪峰径流量 Peak flow/ (m ³ /s)	洪峰发生时间 Peak flow time(hr: min)	径流系数 Runoff coefficient
S1	10	8.49	1.02	0.28	16:20	0.65
S2	20	10.39	0.91	0.25	16:20	0.57
S3	30	11.67	0.83	0.22	16:20	0.53
S4	40	12.16	0.80	0.22	16:20	0.51
S5	50	12.43	0.79	0.23	16:15	0.50
S6	60	12.62	0.78	0.23	16:15	0.50
S7	70	12.78	0.77	0.25	16:20	0.49
S8	80	12.92	0.76	0.27	16:20	0.48
S9	90	13.04	0.75	0.28	16:20	0.48
S10	100	13.16	0.75	0.30	16:20	0.47
S11	100	6.6	1.14	0.31	16:15	0.72
S12	100	6.6	1.14	0.31	16:15	0.72

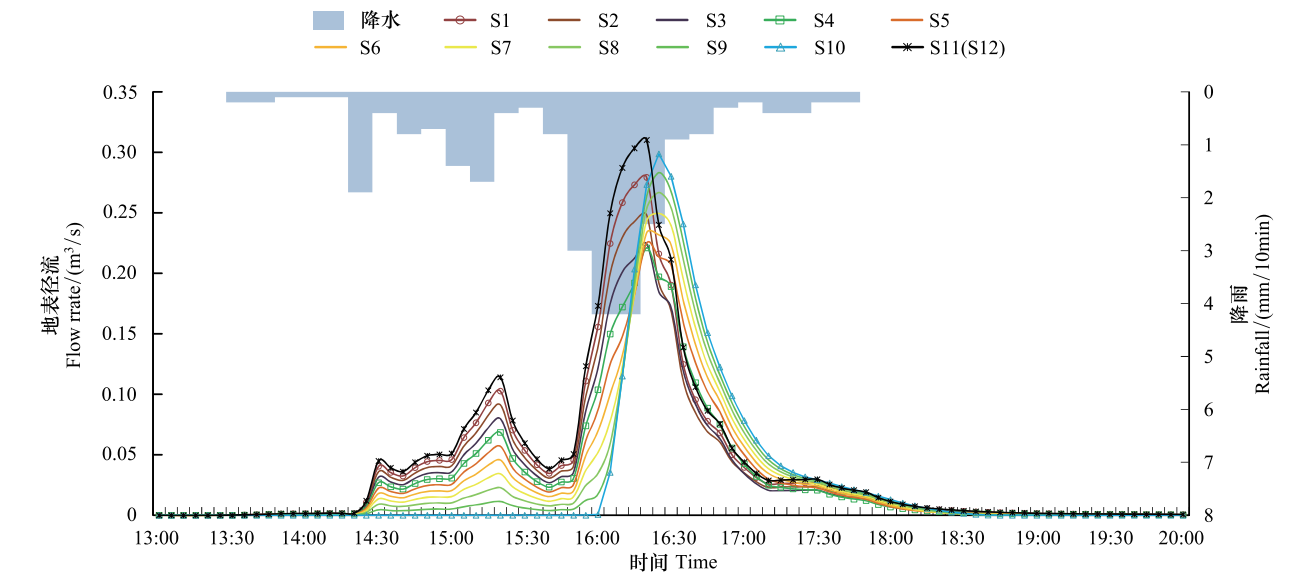


图 5 不同汇流情景下地表径流过程曲线

Fig.5 Temporal variation in surface runoff of each designed routing scenario

3.2 不同汇流演算模式与土地利用格局下雨水井的进流量变化特征

不同汇流演算模式与土地利用格局下雨水井的进流量变化特征与汇水区地表径流变化特征基本一致。在与汇水区相对应的 12 个雨水井中,雨水井 J11 和 J12 的平均进水深度、洪峰进水深度、总进流量容积、洪峰进流量相同且均为最大(表 4,图 6)。与考虑 UIA 的汇水区 S10 的雨水井 J10 相比,J11 和 J12 的平均进水深度、总进流量容积、洪峰进水深度和洪峰流量较 J10 的分别高出 85.7%、52.4%、2.2%和 3.7%,洪峰进水深度发生时间也提前了 5 分钟(表 4,图 6)。在雨水井 J1 至 J10 中,随着土地利用格局的变化演算面积比逐渐增加

(由 10% 增为 100%), 平均进水深度、总进流量容积逐渐降低, 而洪峰进水深度和洪峰进流量则先降后升, 且在演算面积比为 30% 和 40% 时(雨水井 J4)洪峰进水深度和洪峰进流量两者最小, 分别为 0.39m 和 0.22m³/s (表 4, 图 6)。另外, 降雨强度也对雨水井的进流量变化特征具有一定的影响, 降雨强度增大到一定程度时进流量则明显增大, 且发生时间的延迟变小(图 6)。

表 4 各汇水区对应雨水井模拟结果统计表
Table 4 Variation in junction flow rate and peak flow time of the designed twelve sub-catchments

雨水井名称 Junction	平均进水深度 Average depth/m	总进流量容积 Total flow volume/ (10 ⁶ L)	洪峰进水深度 Average peak depth/m	洪峰进流量 Average peak flow/(m ³ /s)	雨水井洪峰时间 Peak flow time (hr:min)
J1	0.12	1.02	0.44	0.28	16:20
J2	0.11	0.91	0.41	0.25	16:20
J3	0.11	0.83	0.39	0.22	16:20
J4	0.10	0.80	0.39	0.22	16:20
J5	0.10	0.79	0.39	0.23	16:20
J6	0.10	0.78	0.40	0.23	16:20
J7	0.10	0.77	0.41	0.25	16:25
J8	0.09	0.76	0.43	0.27	16:25
J9	0.09	0.75	0.45	0.28	16:25
J10	0.07	0.75	0.46	0.30	16:25
J11	0.13	1.14	0.47	0.31	16:20
J12	0.13	1.14	0.47	0.31	16:20

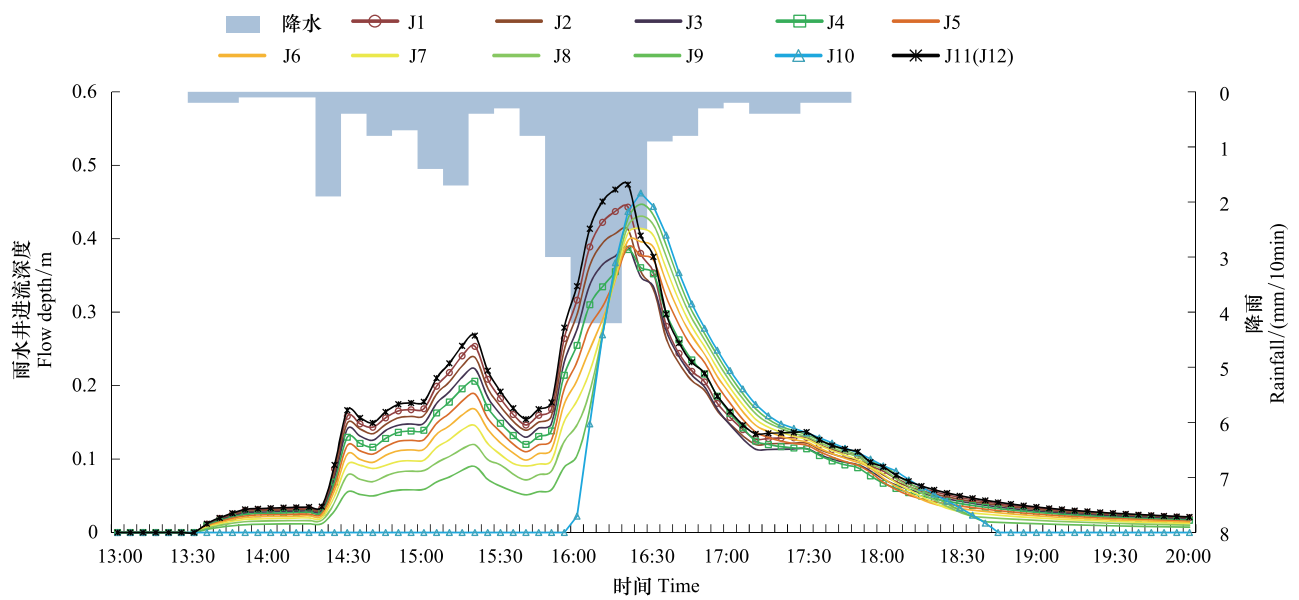


图 6 不同汇流情景下的雨水井进水深变化曲线
Fig.6 Temporal variation in inflow depth of different junctions under each designed routing scenario

4 结论与讨论

本文基于设定的城市社区尺度实验区以及巴中市的真实降水数据, 通过在 SWMM 模型的汇水模块中设置 Outlet、Impervious、Pervious 三种汇流模式及其演算面积比, 定量分析了不同地表汇流演算模式与土地利用格局变化对城市雨洪模拟结果的影响。结果表明: 1) Outlet、Impervious 两种汇流演算模式下汇水区地表径流

的模拟结果相同,但与 Pervious 模式下的模拟结果差异显著。2) 在 Pervious 模式下,演算面积比对汇水区地表径流模拟结果具有重要影响。因而,在运用 SWMM 模型对城市雨洪管理进行模拟分析时,应根据不同的汇水区土地利用格局设置相应的汇流演算模式。另外,本文通过设置 12 个基本特征相同的汇水区实验单元,在等量渗透面、但不同土地利用格局情景中,对比分析通过优化土地利用格局降低 DCIA 对城市雨洪管理效应的影响,为小尺度上土地利用格局优化与地表汇流模式选择提供了重要的参考。研究结果表明,在一定降雨条件下,最大化地使渗透面对有效不透水面进行阻断的土地利用格局,可使汇水区总下渗量提高 99.3%,总径流量下降 52%,径流系数下降 52.4%。因而,在海绵城市的规划与建设中,可从合理优化城市土地利用格局的角度,通过采用 LID 措施,将城市绿地和 LID 处理后的渗透面等作为不透水面的有效阻隔,能够有效降低 DCIA(增加 UIA),大幅提高下渗量和降低地表径流量;并能显著推迟洪峰发生时间,从而从源头上有效降低城市雨洪灾害的风险。由此可见,在小尺度上实现城市用地空间布局与地表汇流模式的协同优化,是海绵城市规划与建设实践成功的关键因素和重要路径。

但本文仅针对一次降雨事件(26.4mm)和一种不透水面比重(75%)进行了城市雨洪管理的定量模拟,未能综合考虑不同降雨事件和不同不透水面比重对 SWMM 模型模拟的敏感性。因此,相关结论还需要进一步对比分析与验证。另外,如何实现将小尺度上的城市雨洪管理效应上推至城市功能区和流域尺度,仍需深入探讨。在大尺度上以及用地构成复杂的城市功能区中,快速准确地概化汇水区的 DCIA(或 UIA)和演算面积比,将能显著提高 SWMM 模型的模拟精度,从而为 LID 的空间格局优化及其对城市雨洪管理效应的影响评价提供支撑。

致谢:感谢四川省巴中市气象局为本研究提供了详细的降雨数据资料。

参考文献(References):

- [1] Peters N E. Effects of urbanization on stream water quality in the city of Atlanta, Georgia, USA. *Hydrological Processes*, 2009, 23(20): 2860-2878.
- [2] 胡伟贤,何文华,黄国如,冯杰. 城市雨洪模拟技术研究进展. *水科学进展*, 2010, 21(1): 137-144.
- [3] 孙艳伟,魏晓妹, Pomeroy C A. 低影响发展的雨洪资源调控措施研究现状与展望. *水科学进展*, 2011, 22(2): 287-293.
- [4] Mansell M G. *Rural and Urban Hydrology*. London: Thomas Telford Ltd, 2003.
- [5] Moglen G E, Kim S. Characteristics and impact of imperviousness from a GIS-based hydrological perspective//AGU Fall Meeting Abstracts. AGU, 2005: 449-449.
- [6] Bosley II, Kern E. Hydrologic evaluation of low impact development using a continuous, spatially-distributed model [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2008.
- [7] Hsu M H, Chen S H, Chang T J. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system. *Journal of Hydrology*, 2000, 234(1/2): 21-37.
- [8] Rossman L A. *Storm water management model user's manual*, version 5.0. Cincinnati, OH: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, 2010.
- [9] Aad M P A, Suidan M T, Shuster W D. Modeling techniques of best management practices: rain barrels and rain gardens using EPA SWMM-5. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2010, 15(6): 434-443.
- [10] Sun N, Hong B, Hall M. Assessment of the SWMM model uncertainties within the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) framework for a high-resolution urban sewershed. *Hydrological Processes*, 2014, 28(6): 3018-3034.
- [11] 张书亮,干嘉彦,曾巧玲,闫国年. GIS 支持下的城市雨水出水口汇水区自动划分研究. *水利学报*, 2007, 38(3): 325-329, 336-336.
- [12] 陈杰,龚颖,游宏凯. 低冲击开发(LID)技术在武钢厂前生态停车场景观设计中的运用. *现代园林*, 2013, 10(5): 60-66.
- [13] Yao L, Wei W, Chen L D. How does imperviousness impact the urban rainfall-runoff process under various storm cases?. *Ecological Indicators*, 2016, 60: 893-905.
- [14] 赵冬泉,陈吉宁,佟庆远,王浩正,曹尚兵,盛政. 子汇水区的划分对 SWMM 模拟结果的影响研究. *环境保护*, 2008, 394(8): 56-59.
- [15] 孙艳伟,把多铎,王文川,姜体胜,王富强. SWMM 模型径流参数全局灵敏度分析. *农业机械学报*, 2012, 43(7): 42-49.
- [16] 王浩昌,杜鹏飞,赵冬泉,王浩正,李志一. 城市降雨径流模型参数全局灵敏度分析. *中国环境科学*, 2008, 28(8): 725-729.

- [17] 黄国如, 黄晶, 喻海军, 杨绍沂. 基于 GIS 的城市雨洪模型 SWMM 二次开发研究. 水电能源科学, 2011, 29(4): 43-45, 195-195.
- [18] 王海潮, 陈建冈, 孔刚, 王玉娟, 刘登峰. 基于 GIS 与 RS 技术的 SWMM 构建. 北京水务, 2011, (3): 46-49.
- [19] Huber W C. New options for overland flow routing in SWMM. Urban Drainage Modeling. In: Proceedings of the World Water and Environmental Resources Conference: Urban Drainage Modeling Specialty Symposium. ASCE, Orlando, Florida, 2001: 22-29.
- [20] Earles T A, Guo J, MacKenzie K, Clary J, Tillack S. A non-dimensional modeling approach for evaluation of low impact development from water quality to flood control//Struck S, Lichten K, eds. Low Impact Development 2010: Redefining Water in the City. Reston: American Society of Civil Engineers, 2010: 362-371.
- [21] Yao L, Chen L D, Wei W. Assessing the effectiveness of imperviousness on stormwater runoff in micro urban catchments by model simulation. Hydrological Processes, 2015, doi: 10.1002/hyp.10758.
- [22] Lee J G, Heaney J P. Estimation of urban imperviousness and its impacts on storm water systems. Journal of Water Resources Planning and Management, 2003, 129(5): 419-426.
- [23] Gironás J, Roesner L A, Davis J, Rossman L A. Storm water management model applications manual. U. S.; Environmental Protection Agency, 2009.
- [24] 吴志强, 李德华. 城市规划原理. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.