

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2021.02.08

# 西咸新区海绵城市建设对沔河洪水特性影响模拟研究

纪亚星<sup>1</sup>, 同玉<sup>1</sup>, 侯精明<sup>1</sup>, 苏锋<sup>2</sup>, 杨霄<sup>2</sup>, 吕鹏<sup>2</sup>, 李东来<sup>1</sup>, 石佳<sup>1</sup>

(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, 陕西 西安 710048;

2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为评估海绵化改造对城市内河洪水特性的影响, 基于模型 GAST (GPU accelerated surface water flow and transport model), 定量研究了理想流域和沔河流域西咸新区沔西新城段海绵城市建设前后在 3 种入流条件 (2.75、7.69、17.06 m<sup>3</sup>/s) 和 3 种降雨重现期 (2、10、50 a) 组合工况条件下的洪水流量过程。结果表明: 设计降雨重现期为 2、10、50 a 时, 理想流域的峰值流量削减率在 6.64% ~ 67.34% 之间, 实际流域的峰值流量削减率在 2.66% ~ 43.57% 之间, 两者差别不大。海绵化改造在一定程度上削减了内河的峰值流量, 峰值削减率与上游来流量呈反比, 与区间汇流量成正比。但峰现时间有延迟有提前, 无明显规律。

**关键词:** 海绵城市; 低影响开发; 峰值流量; 数值模拟; 西咸新区; 沔河

中图分类号: TV122; TV873

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)02-0050-08

## Effects of sponge city construction on flood characteristics of Fenghe River in Xixian New Area

JI Yaxing<sup>1</sup>, TONG Yu<sup>1</sup>, HOU Jingming<sup>1</sup>, SU Feng<sup>2</sup>, YANG Xiao<sup>2</sup>, LÜ Peng<sup>2</sup>, LI Donglai<sup>1</sup>, SHI Jia<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, China; 2. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** To evaluate the impact of sponge transformation on flood characteristics of urban inland rivers, based on GPU accelerated surface water flow and transport model (GAST), the change of flood characteristics of Xixian Fengxi New Area Section, Fenghe River Basin and the ideal basin before and after sponge city construction is quantitatively studied under the combination of three inflow conditions (2.75 m<sup>3</sup>/s, 7.69 m<sup>3</sup>/s, 17.06 m<sup>3</sup>/s) and three rainfall return periods (2 a, 10 a, 50 a). The results indicate that when the rainfall return period is 2 a, 10 a and 50 a the peak flow reduction rate of the ideal basin is in the range of 6.64% - 67.34%, and that of the actual basin is in the range of 2.66% - 43.57%, which is not significantly differentiated. In other words, sponge transformation reduces the peak flow of inland rivers to some extent, the rate of which is in inverse proportion to the upstream flow but direct proportion to the interval influx. It will either delay or bring forward the occurrence of peak flow, showing an irregular pattern.

**Key words:** sponge city; low impact development (LID); peak flow; numerical simulation; Xixian New Area; Fenghe River

## 1 研究背景

近年来,我国极端气候频发,其致灾性备受人们关注<sup>[1]</sup>。北京 2018 年“7·16”降雨事件中 18 个气象站有 4 个台站降雨量超 100 mm, 拥堵道路数量多达日常的 1.5 倍<sup>[2]</sup>。西北地区有 63% 的暴雨集中在 7-8 月,且

1 h、10 min 的雨量极值相对较高<sup>[3]</sup>。西安市更是在 2020 年 7 月遭遇两场短历时高强度降雨,积水点遍布主城区,下穿通道积水尤其严重,水深高达成人腰部,一些车辆在水中熄火,社会影响严重<sup>[4]</sup>。为应对水灾害带来的一系列自然灾害问题,我国提出并践行了建设海绵城市的思路<sup>[5]</sup>。周志才<sup>[6]</sup>基于 SWMM (storm

收稿日期:2020-09-22; 修回日期:2021-02-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51709223); 陕西省科技厅项目(2017JQ3043)

作者简介:纪亚星(1996-),女,河北邢台人,在读硕士研究生,主要从事城市水利学方面研究。

通讯作者:同玉(1984-),女,陕西咸阳人,博士,讲师,主要从事水生态修复、水分-土壤-植物相互关系研究。

water management model)模拟了上海市松江国际生态商务区海绵城市建设,在芝加哥雨型设计 50 年一遇降雨时,径流深总量削减高达 33.82 mm,而且对污染负荷控制也起到一定效果。陈稻等<sup>[7]</sup>以北京市通州区某建筑小区海绵化改造为例,表明低影响开发(low impact development, LID)设施布设对雨水径流调控后,可减少内涝点,减轻管道负荷。但海绵城市建设不单是 LID 设施的简单布设,LID 类型的选用、土地利用格局的划分、气候条件等均与之关系密切<sup>[8-10]</sup>。沔西新城海绵城市建设径流控制率可达 80%~85%<sup>[11]</sup>,其海绵城市建设经验对相似地区具有借鉴意义<sup>[11-12]</sup>。针对西咸新区沔西新城的海绵化改造,马越等<sup>[13]</sup>研究表明,在低影响开发后原道路积水阻碍通行的易涝积水状况通过渗透铺装增加下渗量而得到明显改善,可以为人们的交通出行带来便利。刘力等<sup>[14]</sup>通过对比西咸新区 LID 设施布置前后两场相似降雨,在均匀监测的 8 个内涝点中有 3 个点积水消失,其中秦皇大道在 LID 设施作用下最大积水面积由 531 m<sup>2</sup> 减为 0。陈光照等<sup>[15]</sup>研究发现海绵城市建设后即使面对空间分布非一致性降雨,城市内涝也可以被减弱。这些研究均表明海绵城市建设可以应对多种形式降雨。另外,姚原等<sup>[16]</sup>研究发现森林覆盖率变化正向影响流域洪水峰值削减率及峰现时间。

海绵城市建设使得原本通过管网排出的雨水自然下渗或就地存储,从而减少了外排量,至于对流域内河洪水特性是否产生影响,仍缺少相关资料验证。为了进一步明确海绵城市建设对内河产生的影响,本文基于侯精明等<sup>[17]</sup>开发出的一套高效、高精度地表水动力数值模型 GAST (GPU accelerated surface water flow and transport model),模拟分析了沔西新城海绵城市试点区低影响开发(LID)改造前后沔河西咸新区段峰值流量的变化并得出量化结论。该模型对城市雨洪过程、内涝、泥沙输移等均有较好的模拟效果<sup>[18-20]</sup>。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 研究区概况

本文首先利用理想流域进行定性分析,接着对实际流域进行模拟,两者相互验证。由 Overton 等<sup>[21]</sup>提出的 V 型理想流域示意图见图 1。图 1 中河道宽为 20 m,河道坡度  $i_1 = 0.02$ ,两岸为对称的边坡,单侧边坡宽为 800 m,边坡坡度  $i_2$  为 0.05,流域总长为 1 000 m,面积为 162 hm<sup>2</sup>,下垫面类型为林地、草地和河道。根据 Hou 等<sup>[22]</sup>的研究发现,V 型

流域河道坡度小于 0.05 时,一侧斜坡平面上林地和草地各占 50% 且林地土地利用类型位于集水区斜坡中间对减弱洪水最有效。依照这种设置,单侧边坡的土地利用情况如图 1 右边坡布置,林地于斜坡中间且与草地的面积相等。

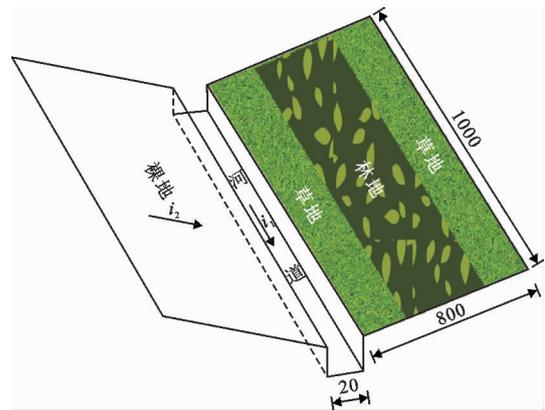


图 1 V 型理想流域示意图(单位:m)

实际研究区选取沔河西咸新区段的沔西新城,南起沔润西路,东临沔河,北至西兴高速公路,西到秦皇大道,河长 2.4 km,总面积为 10.36 km<sup>2</sup>,其区位概况见图 2。研究区地势高程变化不大,微向沔河河床倾斜。沔河发源于西安市长安区,流经咸阳市,然后汇入渭河,多年平均降水量为 806.6 mm,秋季降雨量占比为全年的一半左右,相对集中,最大峰值流量达 1 430 m<sup>3</sup>/s<sup>[23]</sup>。



图 2 实际研究区沔西新城区位概况

目前,西咸新区沔西新城的部分海绵设施已建成,包括一些主要道路两侧以及小区内布设的生物滞留带、秦皇大道以及康定和园内布设的透水铺装、西部云谷楼顶等地采用的绿色屋顶<sup>[14]</sup>。研究区内除已建成的海绵设施区域外,其他区域也在规划建

设中,参数统一按照已建成海绵设施区域选择。基于海绵化改造前后两种情景定性、定量模拟河道在不同上游来流和不同区间汇流的组合工况下出口断面流量过程线。

## 2.2 数据来源、参数确定及研究工况

海绵化改造极大程度地改变了下垫面不透水的缺点。模型输入资料包括地形、土地利用类型、下渗、降雨及河道入流等5部分。V型地形采用5 m结构网格,网格数为64 800个。改造前为情景1,改造后为情景2,不同情景对应不同下垫面参数,改造前的下渗值明显小于改造后。由于实际流域地形更加复杂,测算后采用高精度DEM数据,网格尺寸为2 m×2 m,数量为259×10<sup>4</sup>个。研究区数字高程分布情况如图3所示。

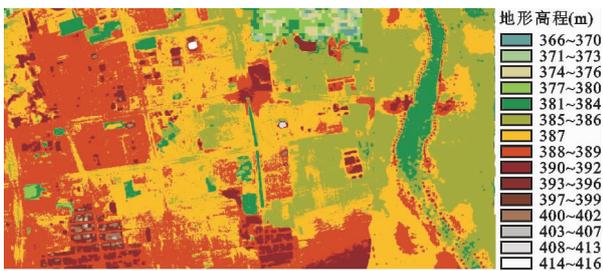


图3 沔西新城数字高程图

基于正射影像将研究区下垫面划分为草地、林地、裸地、道路、居民用地、河道共6种不同土地利用类型,其具体分布情况见图4。根据侯精明等<sup>[17]</sup>采用的不同土地利用类型的曼宁系数,选取适合本文的曼宁系数值。其中河道曼宁系数根据地形实际情况取为0.023<sup>[24]</sup>。



图4 沔西新城各土地利用类型分布

研究区海绵化改造前,居民用地和道路交通大多数为硬化的不透水地面,透水能力较小,改造前下渗参数根据相关文献确定<sup>[17]</sup>,草地、林地、裸地的下渗能力依次增大。经过复杂的LID改造后,城市内涝现象得到有效缓解,研究区年径流总量控制率在80%~85%之间<sup>[11]</sup>。采用双环入渗仪对典型LID设施的下渗进行测量,下渗参数根据实际情况率定,

实际研究区改造前、后不同下垫面曼宁系数及下渗参数取值如表1所示。理想流域3种土地利用类型参数取值与实际研究区相同。

表1 实际研究区改造前、后不同下垫面曼宁系数及下渗参数取值

土地利用类型	曼宁系数	下渗率/(cm·h <sup>-1</sup> )	
		改造前	改造后
草地	0.240	0.50	12.78
林地	0.400	0.60	18.81
裸地	0.080	0.30	21.65
道路	0.014	0	7.77
居民用地	0.015	0.11	7.77
河道	0.023	0	0

采用沔西新城设计暴雨强度公式<sup>[14]</sup>,如公式(1)所示。

$$i = \frac{1239.91 \times (1 + 1.971 \times \lg P)}{167 \times (t + 7.7246)^{0.8124}} \quad (1)$$

式中: $i$ 为设计暴雨强度,mm/min; $P$ 为重现期,a; $t$ 为降雨历时,min。

降雨重现期 $P$ 选为2、10和50 a,历时均为2 h,各降雨重现期的设计降雨过程如图5所示,其中80%的降雨量集中在0.50~1.20 h时间段内。

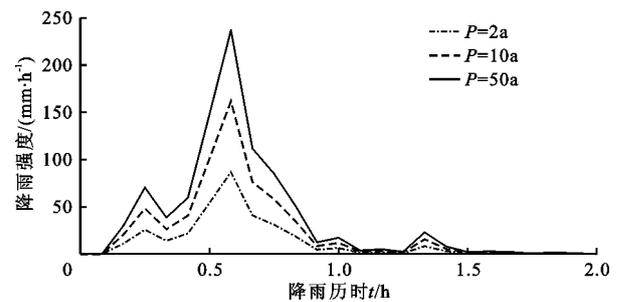


图5 各降雨重现期的设计降雨过程

根据潘景辰<sup>[25]</sup>文中提到的沔河历史最大、最小以及平均年径流量值,通过公式(2)将年径流量与流量进行转换,假设上游来流均为恒定流,得出沔河最大流量为17.06 m<sup>3</sup>/s,最小流量为2.75 m<sup>3</sup>/s,平均流量为7.69 m<sup>3</sup>/s。

$$\bar{Q} = Q/T \quad (2)$$

式中: $\bar{Q}$ 为平均流量,m<sup>3</sup>/s; $Q$ 为年径流量,m<sup>3</sup>;  $T$ 为时间,s。

河道上游来流流量 $Q_0$ 分别采用2.75、7.69、17.06 m<sup>3</sup>/s 3种大小不同的均匀流,与选定的3种降雨重现期进行组合。各组合工况及名称如表2所示。

表 2 各研究工况组合方式及名称

来流流量 $Q_0 /$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	降雨重 现期/a	组合方式	工况名称
2.75	2	2.75	工况 1
		2.75 + 2a	工况 2
		2.75 + 10a	工况 3
		2.75 + 50a	工况 4
7.69	2	7.69	工况 5
		7.69 + 2a	工况 6
		7.69 + 10a	工况 7
		7.69 + 50a	工况 8
17.06	2	17.06	工况 9
		17.06 + 2a	工况 10
		17.06 + 10a	工况 11
		17.06 + 50a	工况 12

模拟过程中采用节点等效管网,即 1 次降水的部分水量经土地下渗自行消纳,超出土地稳定下渗能力的多余水量利用节点等效排进河道,假设这一过程中所有多余降水量均被排出,不在当地形成内涝积水。模型除入口与出口外其余均为闭边界,模拟时库朗数取为  $0.5^{[15]}$ 。

### 2.3 研究方法

模型控制方程为二维浅水方程(shallow water equations, SWEs),守恒格式的矢量形式为:

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (3)$$

其中:

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} uh \\ uq_x + gh^2/2 \\ uq_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} vh \\ vq_x \\ vq_y + gh^2/2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} i \\ -gh\partial z_b/\partial x \\ -gh\partial z_b/\partial y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -C_f u \sqrt{u^2 + v^2} \\ -C_f v \sqrt{u^2 + v^2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{q}$  为变量矢量;  $h$  为水深,  $\text{m}$ ;  $q_x, q_y$  分别为  $x, y$  方向的单宽流量,  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $u$  和  $v$  分别为  $x, y$  方向的流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\mathbf{F}$  和  $\mathbf{G}$  分别为  $x, y$  方向的通量矢量;  $\mathbf{S}$  为源项矢量;  $i$  为入渗

源项;  $z_b$  为河床底面高程,  $\text{m}$ ;  $C_f = gn^2/h^{1/3}$  为谢才系数,  $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ ;  $n$  为曼宁系数。

模型采用 Godunov 格式的有限体积法对方程进行空间离散,通过 HLLC 近似黎曼求解器求解通量<sup>[26]</sup>。采用静水重构法解决负水深问题,取小到可以忽略的初始水深来判定湿网格<sup>[27]</sup>。摩阻源项采用稳定性较好的隐式法;时间积分的二阶精度用二阶显式 Runge - Kutta 方法来实现<sup>[28]</sup>。针对模型计算中由非物理现象引起的计算不稳定性和物质动量不守恒的问题,采用具有二阶精度的 MUSCL 格式解决。模型作者在提高模拟效率方面采用了 GPU 加速技术<sup>[18]</sup>。

## 3 结果与分析

通过对流量过程、峰值流量以及峰现时间的分析来评估海绵建设后内河洪水特性的变化。本文采用基于水动力的数值模型模拟计算理想流域和实际研究区河道出口断面洪水过程线。

理想流域选取降雨历时 2 h,模拟 5 h 后结束,时间步长为 300 s。当上游来流稳定后即在入流 1 h 后加入降雨。图 6 为理想流域不同情景各工况出口断面洪水流量( $Q_d$ )过程线的模拟结果。由图 6 可明显看出,改造后(情景 2)的出口断面洪水峰值明显比改造前(情景 1)减小。

在沔河西咸新区段对上述不同降雨重现期与不同入流的组合工况进行数值模拟。模拟总历时为 24 h,全时长均有上游来流,待上游来流充满整个河道且稳定后,即在第 18 h 加入设计降雨,图 7 为实际研究区改造前、后各工况出口断面洪水流量( $Q_a$ )过程线的模拟结果。

从峰现时间以及峰值流量两个方面定量分析海绵城市建设对河流洪水过程的影响。理想流域不同情景各工况出口断面洪水流量的峰现时刻如表 3 所示。由表 3 可看出,情景 2 条件下各工况的峰现时刻相同,均出现在 6 000 s 时。重现期为 2 a 时,工况 10 在情景 2 条件下峰现时刻比情景 1 提前 900 s,其余工况均提前 1 200 s;重现期为 10 a 时,3 种工况在情景 2 条件下峰现时刻均比情景 1 提前 4 200 s;重现期为 50 a 时,3 种工况在情景 2 条件下峰现时刻均比情景 1 提前 3 300 s。由此可见,重现期为 10 a 时峰现提前时间最长,50 a 重现期次之,2 a 重现期提前时间最短。

实际研究区改造前、后各工况出口断面洪水流量的峰现时刻如表 4 所示。

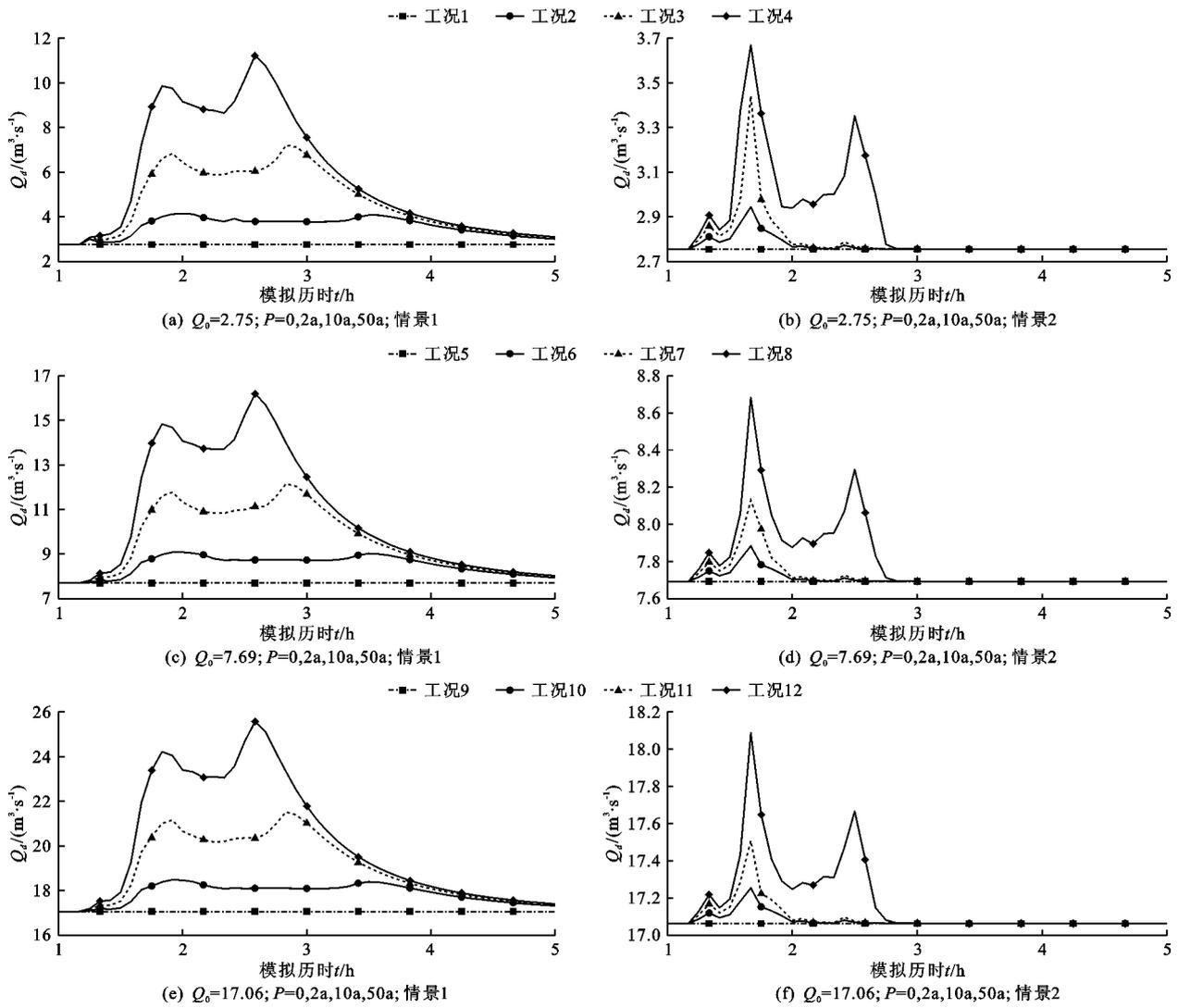


图6 理想流域不同情景各工况出口断面洪水流量( $Q_d$ )过程线

表3 理想流域不同情景各工况出口断面洪水流量峰现时刻

组合 工况	峰现时间/s		
	情景1	情景2	情景2比情景1提前时间
工况1			
工况2	7200	6000	1200
工况3	10200	6000	4200
工况4	9300	6000	3300
工况5			
工况6	7200	6000	1200
工况7	10200	6000	4200
工况8	9300	6000	3300
工况9			
工况10	6900	6000	900
工况11	10200	6000	4200
工况12	9300	6000	3300

表4 实际研究区改造前、后各工况出口断面洪水流量峰现时刻

组合 工况	峰现时间/s		
	改造前	改造后	改造后比改造前提前
工况1			
工况2	68100	68100	0
工况3	68700	67800	900
工况4	68700	67800	900
工况5			
工况6	71400	72300	-900
工况7	70200	72300	-2100
工况8	69300	72300	-3000
工况9			
工况10	70200	71100	-900
工况11	69900	71100	-1200
工况12	69000	71100	-2100

由表 4 可看出,重现期为 2 a 时,工况 2、6、10 的峰现时刻在改造后比改造前分别延迟 0、900、900 s;重现期为 10 a 时,工况 3 的峰现时刻在改造后条件下比改造前提前 900 s,工况 7、11 的峰现时刻分别延迟 2 100、1 200 s;重现期为 50 a 时,工况 4 的峰现时刻在改造后条件下比改造前提前 900 s,工况 8、12 的峰现时刻分别延迟 3 000、2 100 s。其中工况 8 的延迟时间最长,工况 3、4 略有提前。从峰现时刻来看,海绵化改造对相当于平水年的中等上游来流量影响效果更好。

本文采用洪峰消减率评价海绵化改造后不同上游来流量与不同区间汇流组合工况下对出口断面流量的影响,其计算公式如下:

$$f = (Q_1 - Q_2) / Q_1 \times 100\% \quad (8)$$

式中: $f$ 为洪峰消减率,%; $Q_1$ 、 $Q_2$ 分别为海绵城市改造前、后的峰值流量, $m^3/s$ 。

通过公式(8)计算,理想流域各工况峰值流量削减率如图 8 所示。计算结果表明,重现期为 2 a 时,工况 2、6、10 的峰值流量削减率分别为 28.86%、13.18%、6.64%;重现期为 10 a 时,工况 3、7、11 的峰值流量削减率分别为 52.24%、33.07%、18.64%;重现期为 50 a 时,工况 4、8、12 的峰值流量削减率分别为 67.34%、46.37%、29.29%。其中工况 4 即上游来流最小且区间汇流最大时的削减率最大,工况 10 即上游来流最大且降雨重现期最小时的削减率最小。

实际流域各工况峰值流量削减率如图 9 所示。计算结果表明,降雨强度为 2 a 时,工况 2、6、10 的峰值流量削减率分别为 16.73%、4.12%、2.66%;重现期为 10 a 时,工况 3、7、11 的峰值流量削减率分别为 30.47%、14.58%、9.21%;重现期为 50 a 时,工况 4、8、12 的峰值流量削减率分别为 43.57%、26.79%、18.74%。

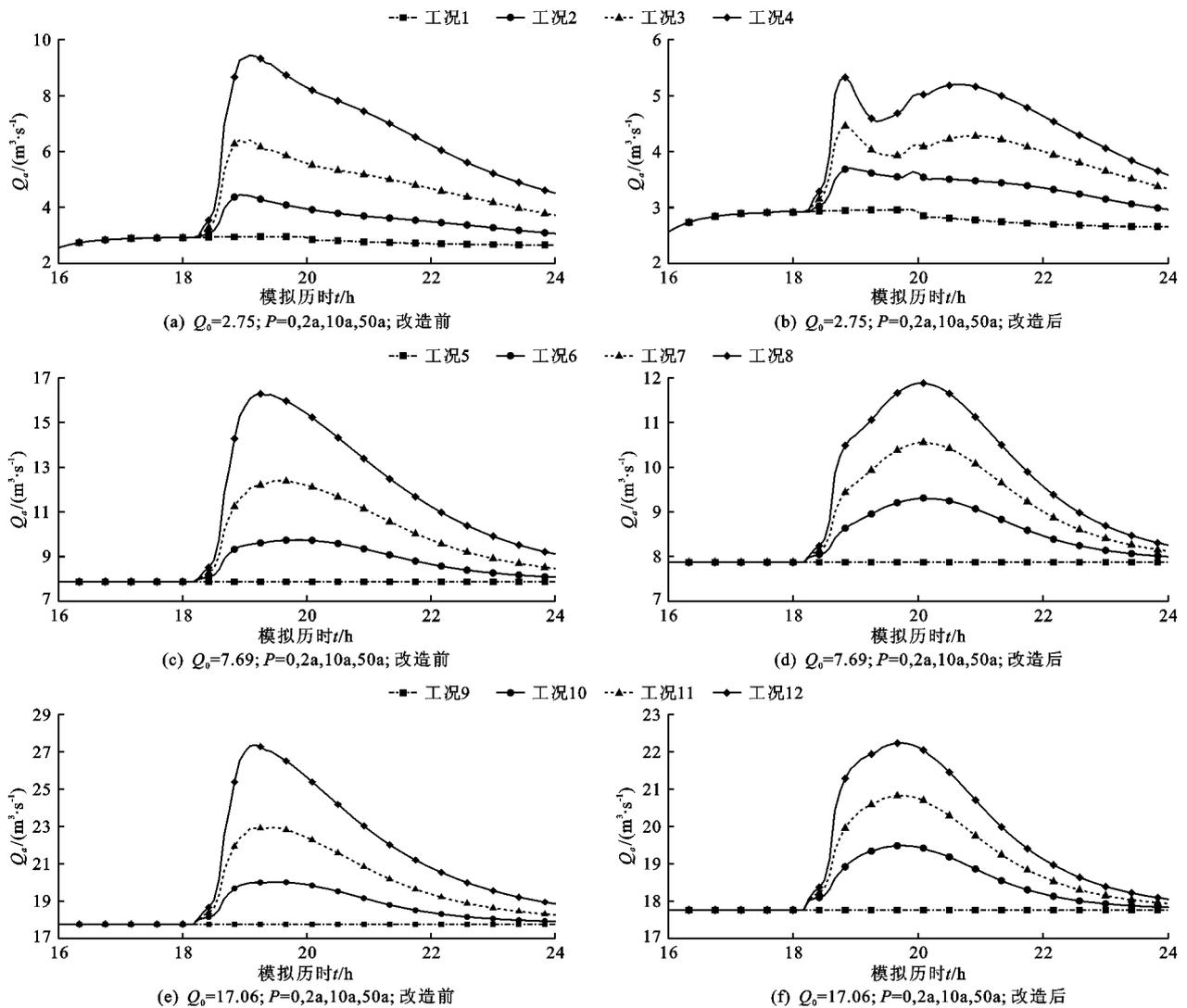


图 7 实际研究区改造前、后各工况出口断面洪水流量( $Q_a$ )过程线

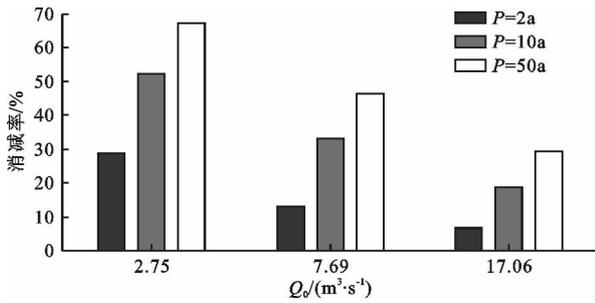


图8 理想流域各工况出口断面峰值流量削减率

通过分析计算结果发现,当重现期不变时,随着上游来流量增大,由于区间汇流所引起的洪峰在整个峰值流量中占比减小,洪峰削减率也随之减小;当上游来流不变时,随着重现期增大,由于区间汇流所引起的洪峰在整个峰值流量中占比增大,峰值削减率则随之增大。即削减率受区间汇流量在总量中的占比影响较大。从峰值流量来看,海绵化改造对相当于枯水年的上游较小来流量影响效果最好,对相当于平水年的上游中等来流量次之,对相当于丰水年的较大上游来流量最差。结合峰现时间与峰值流量的结果分析,海绵化改造对平水年洪水的控制效果最佳。

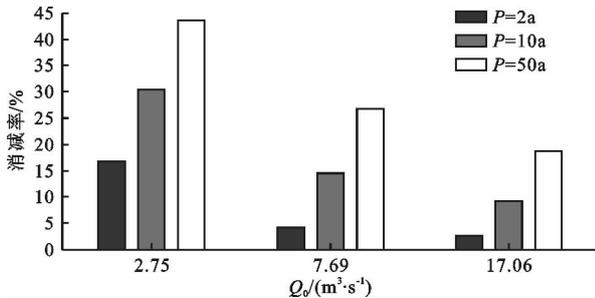


图9 实际研究区各工况出口断面峰值流量削减率

## 4 讨论

本文通过水文及水动力学模型 GAST 对 V 型理想流域和沔河西咸新区沔西新城段实际流域的洪水流量过程进行了模拟,并定量分析了峰现时间和峰值流量。从模拟结果可以看出,理想流域和实际流域在海绵城市建设后均对内河的洪水过程有一定影响,其大小取决于上游来流量与区间汇流量,在河道流量较大,且经常发生高强度降雨的地区进行海绵化建设对内河峰值流量的削减率最大。至于对峰现时刻的影响规律,两者差别较大,还需要进一步研究。本研究对于海绵城市的建设效果有一定的评估作用,尤其是在以管网排水为主的城市。如果海绵化改造建设范围更广,高峰值的洪水事件将发生的

越少,在水生态等方面建议考虑海绵城市建设所带来的影响。

## 5 结论

(1)海绵城市建设前,实际流域各工况的出口断面洪水流量过程曲线形状相似,最大峰值流量为  $27.37 m^3/s$ ,理想流域最大峰值流量为  $25.58 m^3/s$ 。上游来流量和区间汇流量越大,实际流域与理想流域的峰值流量越大,峰现时间越早。

(2)海绵化改造后,与改造前相比,实际流域及理想流域的峰值流量均被削减,实际流域峰值削减率最大为 43.57%,理想流域最大为 67.34%,但两者峰现时间无明显规律。

(3)实际流域与理想流域相比,峰值流量削减有所差别,但规律相同。至于峰现时刻,实际流域各工况在海绵化改造后比改造前有提前也有延迟,最少提前 900 s,最多延迟 3 000 s。而理想流域峰现时刻改造后比改造前均为提前,最少提前 900 s。在洪水发生时,峰现时刻的确定很重要,洪峰越早发生越不利,峰现时刻可能也与地形特性有关。

## 参考文献:

- [1] 耿思敏,严登华,罗先香,等.变化环境下黄河中下游洪涝灾害发展新趋势[J].水土保持通报,2012,32(3):188-191+244.
- [2] 易嘉伟,王楠,千家乐,等.基于大数据的极端暴雨事件下城市道路交通及人群活动时空响应[J].地理学报,2020,75(3):497-508.
- [3] 黄玉霞,王宝鉴,黄武斌,等.我国西北暴雨的研究进展[J].暴雨灾害,2019,38(5):515-525.
- [4] 侯精明,康永德,李轩,等.西安市暴雨致涝成因分析及对策[J].西安理工大学学报,2020,36(3):269-274.
- [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] 周志才.基于SWMM模型的上海市松江国际生态商务区海绵城市建设效果评价[J].环境工程,2020,38(8):167-173.
- [7] 陈韬,夏蒙蒙,刘云鹏,等.基于SWMM的海绵改建小区雨水径流调控研究[J].中国给水排水,2020,36(11):103-111.
- [8] 朱梅,何君涛,黎江少,等.基于SWMM模型的不同LID设施对雨洪控制效果模拟分析[J].水力发电,2020,46(3):24-27+79.
- [9] 孙亚联,李继成,杨东,等.基于水动力模型的土地利用格局对流域雨洪过程的影响研究[J].水资源与水工程学报,2020,31(6):36-40+46.
- [10] 印定坤,陈正侠,李骥安,等.降雨特征对多雨城市海绵

- 改造小区径流控制效果的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(1): 50-56.
- [11] 伍雯臻,李榜晏,马越. 沔西新城海绵城市规划建设浅析[J]. 华中建筑, 2018, 36(3): 88-91.
- [12] 李宇超. 海绵城市建设的理论与实践[D]. 杨陵:西北农林科技大学, 2016.
- [13] 马越,姬国强,石战航,等. 西咸新区沔西新城秦皇大道低影响开发雨水系统改造[J]. 给水排水, 2017, 53(3): 59-67.
- [14] 刘力,侯精明,李家科,等. 西咸新区海绵城市建设对中型降雨致涝影响[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 155-159.
- [15] 陈光照,侯精明,张阳维,等. 西咸新区降雨空间非一致性对内涝过程影响模拟研究[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4): 37-45.
- [16] 姚原,顾正华,李云,等. 森林覆盖率变化对流域洪水特性影响的数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2020(1): 9-15.
- [17] 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.
- [18] 龚佳辉,侯精明,薛阳,等. 城市雨洪过程模拟 GPU 加速计算效率研究[J]. 环境工程, 2020, 38(4): 164-169+175.
- [19] 侯精明,李桂伊,李国栋,等. 高效高精度水动力模型在洪水演进中的应用研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(2): 96-107.
- [20] 李东来,侯精明,王新宏,等. 河床冲淤对洪水演进影响数值模拟研究[J]. 泥沙研究, 2018, 43(5): 13-20.
- [21] OVERTON D E, BRAKENSIEK D L. A kinematic model of surface runoff response [C] // In Proceedings of the Wellington Symposium, Paris: Unesco/IAHS, 1970.
- [22] HOU Jingming, GUO Kaihua, LIU Feifei, et al. Assessing slope forest effect on flood process caused by a short-duration storm in a small catchment[J]. Water, 2018, 10(9): 1256.
- [23] 夏伟,周维博,李文溢,等. 气候变化和人类活动对沔河流域径流量影响的定量评估[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6): 47-52.
- [24] 玛哈沙提·哈孜哈力,努尔夏西·曼斯尔. 天然河道的糙率确定方法分析[J]. 能源与节能, 2017(4): 94-95.
- [25] 潘景辰. 沔河西咸新区段防洪规划设计研究[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2018.
- [26] SMITH L S, LIANG Qihua. Towards a generalised GPU/CPU shallow-flow modelling tool[J]. Computers & Fluids, 2013, 88: 334-343.
- [27] HOU Jingming, LIANG Qihua, SIMONS F, et al. A 2D well-balanced shallow flow model for unstructured grids with novel slope source term treatment[J]. Advances in Water Resources, 2013, 52(2): 107-131.
- [28] HOU Jingming, 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 & Engineering, 2013, 257: 126-149.

(上接第49页)

- [13] 覃殿归. 浅谈水力旋流器工作原理及影响因素[J]. 企业科技与发展, 2020(6): 36-38.
- [14] 庞学诗. 水力旋流器理论与应用[M]. 长沙:中南大学出版社, 2005.
- [15] 袁惠新,于晓辉. 旋流器中最佳操作参数的研究[J]. 矿山机械, 2010, 38(3): 95-97.
- [16] 矫学成,王贵林,张勇,等. 液体旋流分离器分离效率的研究[J]. 环境工程学报, 2007, 1(5): 139-144.
- [17] 楚小飞. 水力旋流器结构尺寸对分离效率的影响分析[J]. 时代农机, 2011, 38(3): 46-46.
- [18] 陈浩,吴文科,吕斌,等. 用双锥-内锥型水力旋流器提纯海洋天然气水合物浆体[J]. 过程工程学报, 2018, 18(3): 491-495.
- [19] 刘霄,黄岁樑,唐婷芳子,等. 人工湿地植物生长特性及其对氮磷富集能力研究[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(5): 1-5.
- [20] 刘霄,黄岁樑,刘学功. 三种人工湿地填料对磷的吸附特性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(6): 16-19.
- [21] 李丹,王欣泽,刘剑楠,等. 多级土壤渗滤系统填料的脱氮除磷性能研究[J]. 水处理技术, 2019, 45(10): 24-29.
- [22] 许光远,徐志嫻,苏振铎,等. 生物慢滤池用于污水深度处理的实验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(4): 186-189.