

平原集水区城镇化对暴雨洪水影响研究

——以常州市双桥浜为例

刘鹏飞 许有鹏 周才钰 陆苗 王强 高斌¹

(南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023)

【摘要】: 城镇化下土地利用变化影响了流域洪水过程, 并可能导致设计洪水发生变化。为进一步辅助城镇化流域防洪设计研究, 以常州市双桥浜集水区为例, 针对城镇化地区管网资料不全、区域管网河(渠)道排水过程复杂的问题, 利用城市河道、道路、集水井等的汇水路径对高度城镇化小区进行子汇水区划分, 基于 HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) 模型建立了适合高度城镇化下平原集水区的降雨-径流模拟模型, 以模拟分析城镇化下土地利用转变对暴雨洪水的影响。结果表明, 城市绿地向城镇化转变的过程较未利用地向城镇化转变使洪水增加得更大更快, 且洪峰的增加幅度小于洪量的增加幅度。同时, 随着土地利用转换程度的增大, 对洪水影响的差异性也在增大, 且低重现期洪水所表现的差异性更为明显。研究结果可为平原河网地区防洪减灾提供一定参考依据。

【关键词】: 汇水区划分 土地利用变化 暴雨洪水 HEC-HMS 模型 城镇化

【中图分类号】: P333.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2020)09-2082-08

城镇化引起的土地利用的剧烈变化是影响水文过程最重要的因素之一^[1,2]。在城镇化进程中, 随着城市人口的增加, 城镇范围不断扩张, 使得不透水面积大幅增加, 自然陆面被不透水面所覆盖, 从而改变流域蒸发截留、填洼下渗等产汇流条件, 加大了洪水的风险^[3], 导致社会经济的严重损失。特别是我国东部地区人口密集、经济发达、城镇化水平高, 易受梅雨和台风暴雨影响, 常引发洪水灾害^[4], 定量研究城市集水区中土地利用变化对暴雨洪水的影响, 对城市发展具有重要的指导意义。

国内外定量研究城镇化对暴雨洪水的影响多采用水文试验对比法^[5,6]、统计数理法^[7]和情景模拟法^[8]。水文试验对比法^[9]利用不同流域的水文要素, 来反映土地利用变化的水文效应, 但不适用于空间差异较大的中大尺度流域。数理统计法^[10]通过极值分布模型来评估城镇化进程中的水文效应, 但是缺少物理机制。基于分布式水文模型的情景模拟法因其可设置不同的土地利用情景来定量模拟、评估、预测城镇化对水文效应的影响, 被广泛用于丘陵^[11]、山地^[12,13]等不同地形的地区。针对长江下游平原河网地区, 高程起伏不大, 水文模型难以划分子汇水区。为此, 多采用河网分布特征的河网多边形法^[14]、河道中心线反推法^[15]来进一步划分流域以研究土地利用格局变化对水文效应的影响。但这些研究均是针对大尺度地区, 对于范围小、汇流时间短的高度城镇化平原城市集水区的研究较少。

城市集水区的暴雨洪水汇流特性受主干河道、管网以及道路的综合影响, 而且新旧管网交汇、管网数据难以完整获取。因此, 本研究提出了一种概化管网数据的方法, 通过考虑城市河道、集水井和道路来进行汇水区划分, 并将该方法应用于

¹作者简介: 刘鹏飞(1996~), 男, 硕士研究生, 主要从事城市水文方面研究。E-mail: liupengfei_1107@163.com

许有鹏, E-mail: xuy305@163.com

基金项目: 国家重点研发计划专项项目(2018YFC1508201); 国家自然科学基金项目(41771032); 江苏水利基金重大项目(2015003)

HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) 降雨径流模型^[16]来验证方法的适用性。再基于构建的模型模拟高度城镇化集水区土地利用方式转变对不同重现期降雨所产生的暴雨洪涝效应, 以为区域防洪减灾提供一定参考。

1 研究区概况

双桥浜集水区位于太湖流域的常州市新北区(图 1), 区域内地势平坦, 整体横贯南北, 北至锦绣路, 在润德半岛附近分成两支, 一支向西至锦绣南苑, 一支向南至北塘河, 河道总长 1.91km(其中西支 0.27km), 河道宽约 20.0m, 水面面积约 $3.82 \times 10^4 \text{m}^2$ 。汇水范围为: 北至龙城大道, 东至龙城大道, 南至沪宁城际高铁和北塘河, 西至通江南路, 其总面积约 1.57km^2 , 其中不透水面比率达 51.3%。北塘河西支上建有双桥浜污水截流泵站, 于北塘河交汇处北侧建有双桥浜排涝泵站, 且在泵站上下游设有 2 个水位站。根据城镇化水平指标^[17, 18], 该小区自 2005 年以来, 人口、经济等经历了快速的发展, 尤其是住宅小区的建设, 导致不透水面积明显增加, 建筑用地面积已达区域面积的 59.45%, 是一个典型的高度城镇化的城市径流小区。

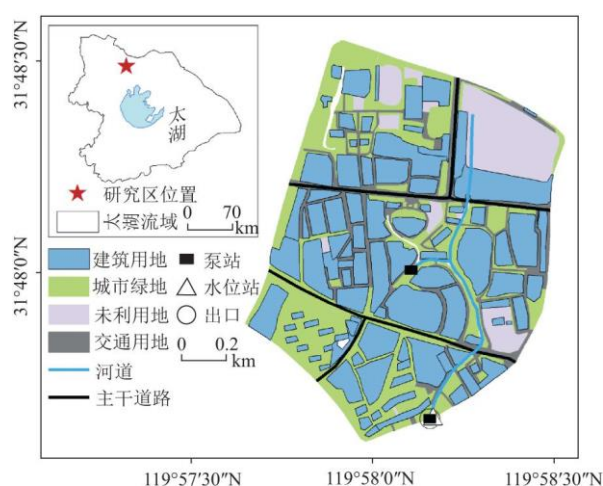


图 1 双桥浜集水区位置及其土地利用类型图

2 数据和方法

2.1 数据来源与处理

研究所用数据主要包括土地利用数据以及水文气象数据。研究区土地利用资料为 2015 年的 Google 影像经人工解译得到, 比例尺为 1:5300, 本文将研究区土地利用类型分为城市绿地、未利用地、水域、城市建设用地四大类, 以分析不同土地利用影响下的水文效应。气象资料来源于常州市常州(三堡街)站的降雨数据, 该站点位于试验区旁, 距研究区 0.98km, 可代表研究区的降雨情况, 主要包括该区域 1951~2017 年逐年最大 24h 降水量、2015~2017 年间 0.5h 步长的降雨数据, 前者用于计算不同重现期下的降雨量, 后者用于率定和验证模型; 水文资料来源于位于集水区内部的两个水位站的水位数据和泵站开启数据, 主要包括该区域 2015~2017 年间 0.5h 步长反推的径流数据以用于水文模型的率定和验证, 其中流量数据根据泵站流量与集水区库容曲线反推入库流量得到。

2.2 HEC-HMS 模型

HEC-HMS 模型是 20 世纪 90 年代由美国陆军工程兵团水资源研究中心开发的一个半分布式降雨径流及洪水演进过程模拟系统^[19, 20], 它考虑了不同子流域的基础表面条件的变化, 具有较高的计算效率, 已被广泛用于研究不同流域土地利用和气候变化对水文

的影响。HEC-HMS 模型汇水过程包括降雨损失、直接径流、基流和河道汇流等四个模块,分别采用了初损曲线法、克拉克单位线法、指数退水法和马斯京根法进行计算。在气象模块中输入常州(三堡街)站降雨数据,设定模拟计算的时间步长为 30min。时间序列数据模块输入研究区中雨量、流量等实测资料,设定模拟计算的时间步长为 30min。

本研究选取纳西效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency, NSE),相对偏差(Percentage bias, PBIAS),确定性系数(Coefficient of determination, R^2)及峰现时差(ΔT)来评价 HEC-HMS 模型的模拟精度,其公式如下^[13]。

$$NSE = 1.0 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{m,t} - Q_{s,t})^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{m,t} - \overline{Q_m})^2} \quad (1)$$

$$PBIAS = \left(\frac{\sum_{t=1}^T (Q_{s,t} - Q_{m,t})}{\sum_{t=1}^T Q_{m,t}} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{m,t} - \overline{Q_m})(Q_{s,t} - \overline{Q_s})}{\left[\sum_{t=1}^T (Q_{m,t} - \overline{Q_m})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{t=1}^T (Q_{s,t} - \overline{Q_s})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad (3)$$

式中: $Q_{s,t}$ 为 t 时刻的流量模拟值; $Q_{m,t}$ 为 t 时刻的流量观测值; $\overline{Q_m}$ 为观测时段的流量平均值; $\overline{Q_s}$ 为模拟时段的流量平均值; T 是模拟的时长。

NSE、 R^2 、PBIAS 的范围是 0 到 1, NSE、 R^2 值越接近于 1, 表示模拟效果越好, PBIAS 则是值越小, 模拟效果越好。 ΔT 的绝对值越小, 表明模型的模拟精准度越高。

3 结果与分析

3.1 平原城市集水区洪水过程模拟

3.1.1 平原城市集水区子流域划分

以往研究是基于 DEM 基础数据, 通过高程的起伏将流域划分为若干子流域, 进行产汇流计算。然而, 高度城镇化的双桥浜集水区处于地形平坦的平原河网区, 高程坡度较小, 地表径流基本可以设定为各向同性^[18]。经过调研, 在双桥浜集水 8 区, 雨水集水井主要沿道路两侧分布。当下暴雨时, 洪水会通过道路汇入到集水井中, 道路也成为汇水通道, 最后注入区域的渠道与河道。同时, 双桥浜集水区的管网资料不全, 并且新旧管网交汇, 使得该地区的产汇流过程难以模拟。因此, 本文建立了一套淡化管网的方法, 以集水井为单位, 利用城市主干道路及河道来划分城市集水区, 并根据 DEM 数据确定汇水方向。

泰森多边形是一种剖分空间平面的方法, 利用该方法划分的汇水区具有以下特点: 每个汇水区内的任何位置到内部的河道(或主干道路)的距离最近, 离相邻汇水区内的河道(或主干道路)距离最远, 且每个汇水区有且仅有一段河道(或主干道路)。因此, 本研究利用泰森多边形, 以研究区内河道和主干道路为源数据, 使用 ArcGIS 软件中的“欧氏分配”工具, 基于“欧氏距离”(二维空间中即两点间的直线距离)将研究区中每个位置与距其最近的河道(或主干道路)进行关联, 得到每段河道(或主干道路)的汇水

区,结果如图 2 所示。

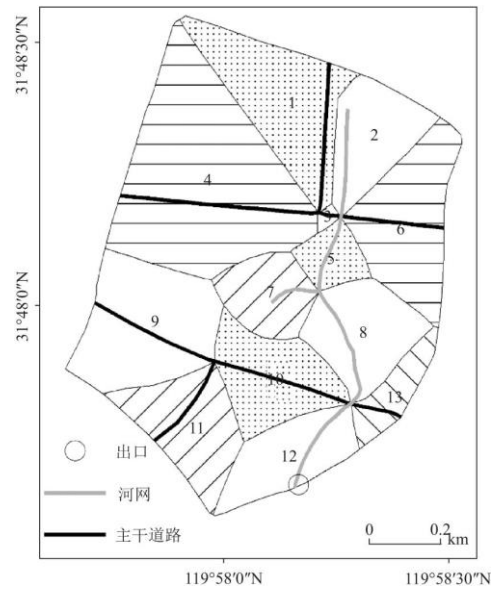


图 2 双桥浜集水区汇水区划分示意图下

3. 1. 2 模型参数率定与验证

基于上述方法构建的汇水区,结合双桥浜集水区 2015 年土地利用数据,构建了双桥浜区域 HEC-HMS 模型,同时利用双桥浜集水区 2015~2017 年间的 7 场典型场次洪水进行模型的率定和验证,其中 4 场暴雨洪水数据用于模型参数率定,另外 3 场暴雨洪水数据用于模型验证,模型率定和验证结果见表 1。

表 1 HEC-HMS 模型模拟研究区 7 场洪水评价结果

阶段	降雨场次	洪峰流量			洪量			峰现时差	NSE	R ²	PBIAS
		实测	模拟	相对误差	实测	模拟	相对误差				
模拟阶段	20150602	6.6	6.6	0.00	76.99	70.76	8.09	0	0.732	0.756	-0.079
	20150625	6.4	6.3	1.56	230.25	188.67	18.06	1.5	0.776	0.844	-0.181
	20160701	2.6	2.6	0.00	33.56	32.35	3.61	1.5	0.879	0.881	-0.019
	20161007	8	7.8	2.50	55.01	49.81	9.45	0	0.831	0.854	-0.088
	绝对平均			1.02			9.80	0.8	0.805	0.834	0.092
验证阶段	20150615	6.8	7.1	4.41	117.69	120.89	2.72	0.5	0.854	0.821	0.051
	20150810	5.5	5	9.09	59.28	65.85	11.08	0	0.923	0.929	0.104
	20160628	5.5	5	9.09	40.77	37.08	9.05	0	0.805	0.920	-0.330

	绝对平均			7.53			7.62	0.2	0.861	0.890	0.162
--	------	--	--	------	--	--	------	-----	-------	-------	-------

如表 1 所示,率定期的四场洪水的 NSE、 R^2 、PBIAS 的绝对平均值分别为 0.805、0.834、0.092,峰值误差和洪量误差基本上控制在 10%以内,峰现时差不超过 1h;验证期的三场洪水的 NSE、 R^2 、PBIAS 的绝对平均值分别为 0.861、0.890、0.162,峰值误差和洪量误差基本上控制在 10%以内,峰现时差不超过 0.5h。另外,研究区面积仅 1.57km^2 ,且与气象站距离 0.98km ,模拟误差受降水异质性影响较小,可能是与模型自身不确定性有关。再对比洪水模拟过程与实测洪水过程线(图 3 和图 4),发现两者较为吻合,说明 HEC-HMS 模型在双桥浜集水区中模拟效果较好。同时证明了本研究构建的以集水井为单位,利用城市主干道路及河道来划分城市集水区的方法,在双桥浜集水区适用性较好,满足暴雨洪水过程模拟的精度要求。

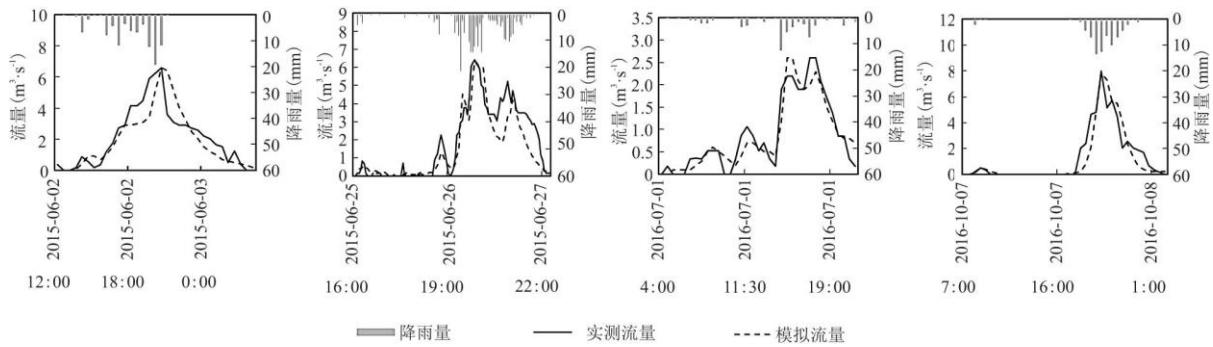


图 3 双桥浜降雨模拟与实测对比图(率定阶段)

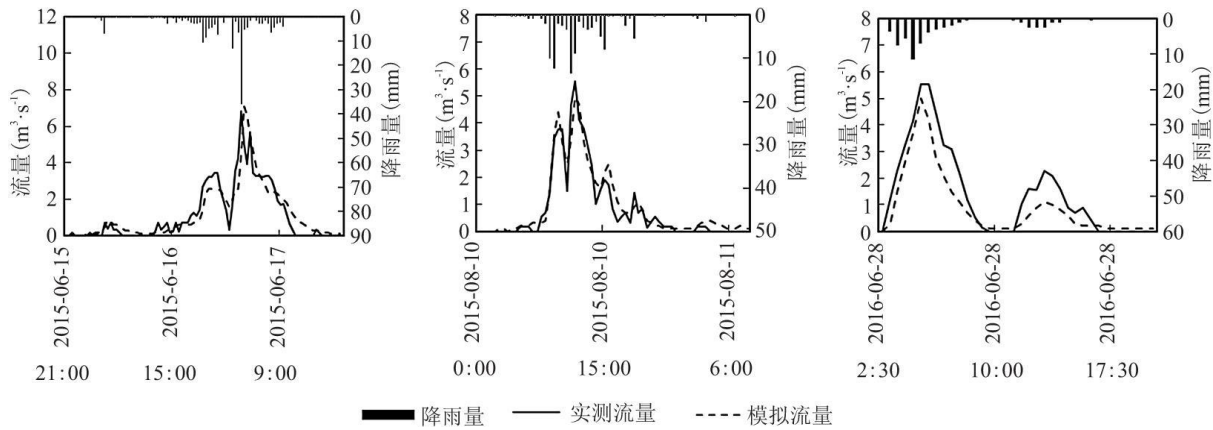


图 4 双桥浜降雨模拟与实测对比图(验证阶段)

3.2 城镇化下土地利用转变对不同量级暴雨洪水的影响

为探讨高度城镇化集水区土地利用方式转变带来的降雨径流效应,基于率定验证好的 HEC-HMS 模型,运用情景分析法,进一步揭示高度城镇化集水区土地利用方式改变的径流响应。根据研究区内 1951~2017 年年最大 24h 降雨量资料,运用 P-III 适线法计算流域内平均最大 24h 的暴雨频率曲线,在此基础上,选取频率为 1%(100 年一遇)、2%(50 年一遇)、4%(25 年一遇)、10%(10 年一遇)及 20%(5 年一遇)的 5 种暴雨类型,利用 1957 年 Keifer 和 Chu 基于暴雨强度公式提出的芝加哥雨型(简称 K.C 法)生成暴雨时程分布,运用 HEC-HMS 模型模拟不同的土地利用情况下不同量级的暴雨洪水过程。

不同土地利用类型的下渗率和不透率存在差异,对同一量级降雨的洪水响应也截然不同。由于区域内建筑用地比例已达到较高城镇化水平,达到流域总面积的 59.45%,其他用地如城镇绿地占 27.97%,未利用地占 11.25%。本文探讨了城镇化用地进一步增多对区域内洪水过程的影响,分别模拟城镇绿地和未利用地以 10%、20%、30%、40%、50%比例分别转变为城市用地时不同量级暴雨洪水过程的变化(图 5)。

由图 5a 与 5b 或 5c 与 5d 比较可见,在城镇绿地和未利用地分别向城镇化用地转化的过程中,洪水洪量与洪峰均发生了不同程度的增加,且洪峰的增加幅度小于洪量的增加幅度。由于城镇绿地的不透水面率较未利用地低,故在不同量级的洪水下,城镇绿地向城镇用地的转化相较于未利用地向城镇用地的转化受到洪峰和洪量的影响更大(见图 5a 与 5c 或 5b 与 5d)。并且这种在不同转变方式下的洪水变化的差异性也随着转变率的增大而变大:当城镇用地以 10%水平增加时,城镇绿地和未利用地减少所引起的 100 年一遇暴雨等级的洪水总量增加的差异为 0.86%,当城市用地以 50%水平增加时,城镇绿地和未利用地减少所引起的洪水总量增加的差异为 4.29%;相对应的,洪水洪峰增加的差异从 0.30%转变为 1.49%。

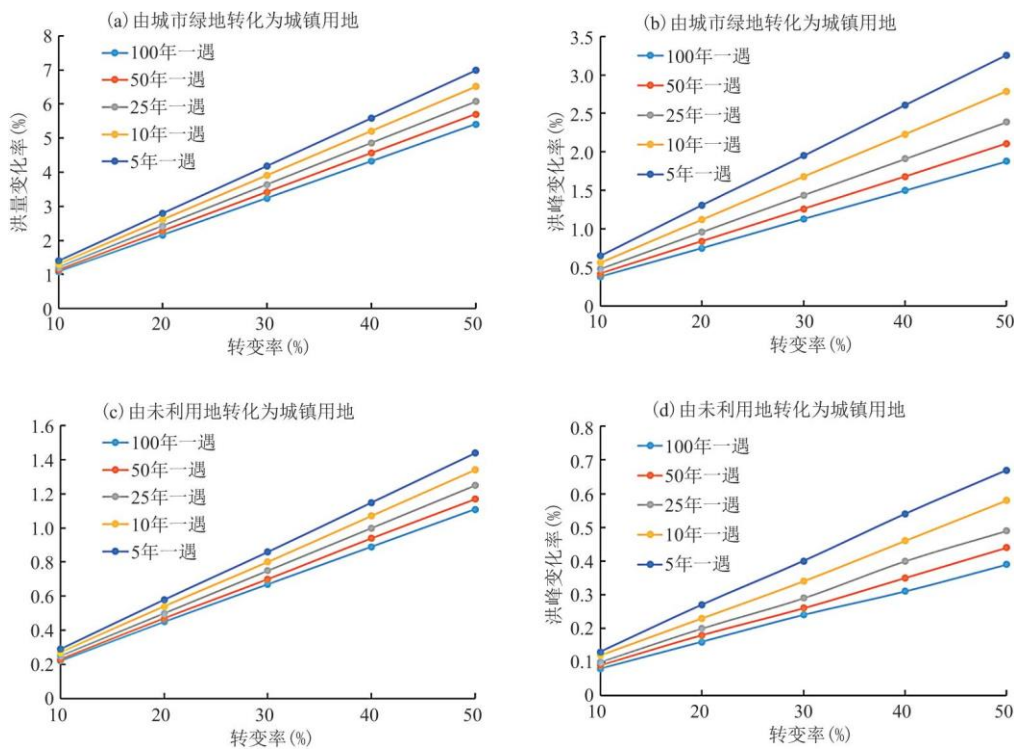


图 5 土地利用类型转变对不同量级暴雨洪水的影响

针对 5 年一遇暴雨等级的洪水,当城市用地从 10%水平增加到 50%水平增加时,城镇绿地和城镇绿地减少所引起的洪水总量增加的差异则表现为 1.11%到 5.55%,洪水洪峰增加的差异从 0.52%转变为 2.59%。可以看出,两者土地利用类型的转变时 5 年一遇的洪水变化的差异较 100 年一遇洪水更明显。即针对不同量级的洪水,量级最小的洪水对土地转变响应最为敏感。当城镇绿地以 10%水平到 50%转变为城市用地时,对于 100 年一遇暴雨等级的洪水总量平均增加了 3.24%,在 5 年一遇暴雨等级的洪水总量则表现为平均增加 4.19%;洪水洪峰对于 100 年一遇到 5 年一遇则表现为分别平均增加了 1.13%和 1.95%。当城镇绿地以 10%水平到 50%转变为城市用地时,于 100 年到 5 年重现期的洪水总量分别平均增加了 0.67%和 0.86%;洪水洪峰则表现为分别增加了 0.23%和 0.40%。即在同样土地利用变化下,量级低的降雨较量级高的降雨对洪水事件的响应程度更大,且量级低的洪水变化的速度随着城镇化水平的增大而表现的更迅速。

4 讨论

城市河网水系的萎缩、排水系统的管网化建设、城市河湖泵站以及蓄水池等都在一定程度上影响城市区域的产汇流特征^[21]。本文同时考虑了河道汇流和城市道路汇水,进而模拟了城市河道渠化所表现出的暴雨洪涝特性,结果表明城镇化明显提高了洪峰流量,城市地面结构的变化改变了水文情势,影响流域产汇流过程,增加了暴雨洪水灾害风险。有研究表明,在中国李仙江流域^[22]、美国圣佩德罗流域^[23]等地区,暴雨径流量与不透水面积呈显著的正相关关系且在城镇化进程中,土地利用类型的变化都会改变相应的径流^[24],这与本文分析结果一致。均表现出土地利用向不透水率越高的类型转化的过程中,所产生的洪峰洪量与现有的差距越大,但针对不同地区不透水率程度不同所产生的洪峰洪量的涨幅不同仍有待探讨^[25]。

另外,本研究发现随着土地利用类型向城镇用地转变程度的增大,洪水所受影响的差异性也在增大,且这种差异性在低重现期洪水所表现的更为明显。针对高重现期降雨,其降雨强度超过了地面下渗能力,地面不透水率对其产流量影响较小,故重现期低的降雨较重现期高的降雨对洪水事件的响应程度更大,小洪水事件的变化率比大洪水事件的变化率比更大^[26]。现已有研究表明,城镇化的发展使得洪水重现期呈现不断提前的趋势,区域洪涝风险有增大的趋势^[27,28]。因此,控制城市不透水面比率,优化管网,开展海绵城市等措施能在一定程度上缓解高度城镇化下平原河网地区的洪涝灾害^[29,30]。

5 结论

针对高度城镇化下平原集水区的洪水过程模拟及洪水响应问题,以常州防洪包围圈内典型城市小区双桥浜集水区为例,基于HEC-HMS 降雨-径流模型开展了平原集水区洪水过程响应分析。主要结论有:

(1) 考虑城市河道、道路、集水井等的汇水路径,以集水井为单位,对平原河网集水区进行子汇水区划分,建立了适合高度城镇化下平原集水区的降雨-径流模拟模型。所构建的降雨-径流模型在率定期与验证期模拟精度较好,该方法适用于高城镇化的平原河网地区,且易于实施。

(2) 不同的土地利用类型的转变方式对洪水的贡献程度不一,其中城镇绿地向城镇化转变的过程较未利用地使洪水增加的更大更快,且随着转变程度的增大,对洪水影响的差异性也在增大,且这种差异性在低重现期洪水表现更为明显。

(3) 研究区已达到较高的城镇化水平,城市用地的增加仍然会对区域内的洪水过程带来较大的变化,加强暴雨洪水对于土地利用的响应研究,并重视城镇化的发展对于洪水径流过程的影响,对于未来的城市建设及防洪减灾具有一定参考意义。

参考文献:

- [1] BRONSTERT A, NIEHOFF D, BÜRGER G. Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: Present knowledge and modelling capabilities[J]. Hydrological Processes, 2002, 16(2): 509-529.
- [2] ZHANG W, VILLARINI G, VECCHI G A, et al. Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by hurricane Harvey in Houston[J]. Nature, 2018, 563(7731): 384-388.
- [3] SCHILLING K E, GASSMAN P W, KLING C L, et al. The potential for agricultural land use change to reduce flood risk in a large watershed[J]. Hydrological Processes, 2014, 28(8): 3314-3325.
- [4] WANG Y, XU Y, LEI C, et al. Spatio-temporal characteristics of precipitation and dryness/wetness in Yangtze River Delta, eastern China, during 1960-2012[J]. Atmospheric Research, 2016, 172-173: 196-205.
- [5] 韩新生, 许浩, 蔡进军, 等. 宁南黄土丘陵区 3 种典型林分的结构与水文影响比较[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 192-199.

-
- [6]SCHNORBUS M, ALILA Y. Generation of an hourly meteorological time series for an alpine basin in British Columbia for use in numerical hydrologic modeling[J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(5):937-942.
- [7]WEI W, CHEN L, ZHANG H, et al. Effect of rainfall variation and landscape change on runoff and sediment yield from a loess hilly catchment in China[J]. Environmental Earth Encees, 2015, 73(3):1005-1016.
- [8]郭军庭, 张志强, 王盛萍, 等. 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(6):1559-1567.
- [9]陈仁升, 阳勇, 韩春坛, 等. 高寒区典型下垫面水文功能小流域观测试验研究[J]. 地球科学进展, 2014, 29(4):507-514.
- [10]LU M, XU Y, SHAN N, et al. Effect of urbanization on extreme precipitation based on nonstationary models in the Yangtze River Delta metropolitan region[J]. Science of the total Environment. 2019, 673:64-73.
- [11]张敏, 刘爽, 刘勇, 等. 黄土丘陵缓坡风沙区不同土地利用类型土壤水分变化特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3):115-120, 128.
- [12]祖拜代·木依布拉, 师庆东, 普拉提·莫合塔尔, 等. 基于 SWAT 模型的乌鲁木齐河上游土地利用和气候变化对径流的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(14):5149-5157.
- [13]SHI P, MA X, HOU Y, et al. Effects of land-use and climate change on hydrological processes in the upstream of Huai River, China[J]. Water Resources Management, 2013, 27(5):1263-1278.
- [14]王船海, 王娟, 程文辉, 等. 平原区产汇流模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(6):627-632.
- [15]李军, 张明华. 基于 Voronoi 图的平原河网汇水区划分方法[J]. 浙江农业科学. 2012(5):761-763.
- [16]US Army Corps of Engineers. User's manual of hydrologic modeling system HEC-HMS version 4.2[R]. London: Hydrologic Engineering Center, 2016.
- [17]郑大川, 刘伟霞, 林中燕, 等. 中国城镇化水平的新分类方法及其实操[J]. 城市问题, 2016, (9):27-34.
- [18]李发志, 朱高立, 候大伟, 等. 江苏城镇化发展质量时空差异分析及新型城镇化发展分类导引[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(11):1774-1783.
- [19]高玉芳, 陈耀登, 蒋义芳, 等. DEM 数据源及分辨率对 HEC-HMS 水文模拟的影响[J]. 水科学进展, 2015, 26(5):624-630.
- [20]JOO J, KJELDSSEN T, KIM H J. A comparison of two event-based flood models (ReFH-rainfall runoff model and HEC-HMS) at two Korean catchments, Bukil and Jeungpyeong[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2014, 18(1):330-343.
- [21]张建云, 宋晓猛, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——I. 城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014, 025(4):594-605.

-
- [22] 窦小东, 黄玮, 易琦, 等. LUCC 及气候变化对李仙江流域径流的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 028(6):1481-1490.
- [23] NIE W, YUAN Y, KEPNER W, et al. Assessing impacts of landuse and landcover changes on hydrology for the upper San Pedro watershed[J]. Journal of Hydrology, 2011, 407(1-4):105-114.
- [24] CHEN J, THELLER L, GITAU M W, et al. Urbanization impacts on surface runoff of the contiguous United States[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 187:470-481.
- [25] BORGA M, STOFFEL M, MARCHI L, et al. Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems:Flash floods and debris flows[J]. Journal of Hydrology, 2014, 518:194-205.
- [26] ZHOU F, XU Y, CHEN Y, et al. Hydrological response to urbanization at different spatio-temporal scales simulated by coupling of CLUE-S and the SWAT model in the Yangtze River Delta region[J]. Journal of Hydrology, 2013, 485:113-125.
- [27] 郑鹏, 林韵, 潘文斌, 等. 基于 HEC-HMS 模型的八一水库流域洪水重现期研究[J]. 生态学报, 2013, 33(4):1268-1275.
- [28] 雷超桂, 许有鹏, 张倩玉, 等. 流域土地利用变化对不同重现期洪水的影响——以奉化江皎口水库流域为例[J]. 生态学报, 2016, 36(16):5017-5026.
- [29] 叶丽梅, 周月华, 向华, 等. 基于 GIS 淹没模型的城市道路内涝灾害风险区划研究[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(6):1002-1008.
- [30] 刘昌明, 张永勇, 王中根, 等. 维护良性水循环的城镇化 LID 模式:海绵城市规划方法与技术初步探讨[J]. 自然资源学报, 2016, 31(5):719-731.