

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.03.009

梅溪流域城镇化进程对山前平原区洪涝过程的影响

蒋卫威^{1,2}, 鱼京善^{1,2}, 徐淑高^{1,2}

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 北京师范大学城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875)

摘要:为探究城镇化进程引起土地利用类型变化对山前平原区洪涝过程的影响,以梅溪流域下游平原区的洪涝镇为例,分析了2002—2018年梅溪流域上游山区和下游平原区的土地利用类型变化,并基于多情景数值模拟,研究了流域尺度内土地利用类型变化对山前平原区洪涝过程和地表淹没状况的影响。结果表明:随着梅溪流域耕地和林地面积减少、城镇建设用地增加,上游山区的径流系数和峰值流量均增大,下游山前平原区的淹没状况更加严重;上游山区的城镇建设用地增加使山区骤发洪水峰值流量增大、峰现时间提前,主要影响地表平均最大淹没水深和平均峰现时间;下游平原区的城镇建设用地增加使内涝发生的时间提前,主要影响地表平均淹没历时。

关键词:城镇化;土地利用类型变化;山前平原区;洪涝过程;梅溪流域

中图分类号:TV124 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)03-0074-08

Impact of urbanization in the Meixi River Basin on flood process in piedmont plain area// JIANG Weiwei^{1,2}, YU Jingshan^{1,2}, XU Shugao^{1,2} (1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Water Circulation and Sponge City Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: To investigate the impact of land use type changes caused by urbanization on the flood process in the piedmont plain area, the Meixi River Basin and Honglai Town in its downstream plain area was selected as the research area. The land use type changes in the upstream mountainous area and downstream plain area of the Meixi River Basin from 2002 to 2018 were analyzed. Based on multi scenario numerical simulation, this study investigates the impact of land use type changes on flood processes and surface inundation in the piedmont plain area at the watershed scale. The results show that with the reduction of arable land and forest land and the increase of urban construction land in the Meixi River Basin, the runoff coefficient and peak flow in the upstream mountainous areas both increase, and the inundation situation in the downstream piedmont plain area becomes more severe. The increase of urban construction land in upstream mountainous areas has increased the peak flow of sudden floods in mountainous areas and advanced the peak time, mainly affecting the average maximum submergence depth on the surface and average peak time. The increase of urban construction land in the downstream plain area has advanced the occurrence of waterlogging, mainly affecting the average duration of surface inundation.

Key words: urbanization; land use type change; piedmont plain area; urban flood process; Meixi River Basin

在城市化进程快速推进和极端暴雨事件频发的共同影响下,我国城市洪涝灾害逐渐严重^[1-3],如2015年南京“6·2”暴雨、2021年郑州“7·20”千年一遇特大暴雨等^[4]。城市洪涝问题已成为制约我国城市发展的重大难题^[5-7]。根据《中国水旱灾害公报》统计数据,2006—2018年我国因洪涝灾害死亡人数达11 860人,直接经济损失2.57万亿元。

因此,开展城市洪涝的相关研究,对保障人民生命财产安全和地区经济发展具有重要意义。

研究表明,城市化进程不但会引起自然河道洪峰流量增加数倍,而且使得较小暴雨事件的洪水风险相对增加,城市化对年际城市雨洪量的影响甚至大于气候变化^[8-10]。城市建设改变了下垫面条件并影响产汇流过程,进而加大了城市洪涝风险。在流

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51779007, 41671018)

作者简介:蒋卫威(1991—),男,博士研究生,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: jiangweiwei@mail.bnu.edu.cn

通信作者:鱼京善(1965—),男,教授,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: yujingshanbnu@163.com

域尺度内,许多学者探究了城市化进程和流域产汇流变化之间的关系^[11-13]。在城市范围内,已有研究多集中在城市化引起径流系数、洪水过程线变化等水文效应方面^[14],关于城市化引起流域洪涝过程和淹没状况的变化等水动力效应方面的研究相对缺乏。现有研究通常通过分析下垫面土地利用类型及其面积组分的变化来反映不同城市化条件对产汇流的影响,也有研究指出土地利用的空间格局对流域雨洪过程的影响十分显著^[15]。因此,需要进一步揭示不同土地利用类型的面积组分和空间格局等变化对洪涝过程和地表淹没状况的影响。

我国南方山区中小流域的下游冲积平原通常分布诸多城镇,这些位于流域山前平原区的城镇具有人口集中、城镇化进程快、洪水风险高等特征^[16-17]。我国东南沿海地区平均每年遭受 2~4 次台风侵袭^[18],这些区域的山前平原城镇往往受到流域上游山区骤发洪水和下游平原区形成的内涝同时影响,洪涝灾害造成的损失巨大。2016 年 9 月,“莫兰蒂”台风登陆泉州市,洪濂气象站 24 h 的累积降水量达 306 mm。强降雨引起了梅溪流域下游平原区的洪濂镇暴发特大洪水,造成了 13 人伤亡和极大的经济损失,流域内的城镇化进程可能是加剧洪濂镇洪涝灾害严重程度的重要原因。因此,本文以东南沿海泉州市的山前平原城镇——梅溪流域洪濂镇为例,利用历史遥感数据和土地利用数据,分析梅溪流域的城镇化进程、流域上游山区和下游平原区的土地利用类型变化,揭示流域土地利用类型变化对上游山区产汇流和下游平原区城镇洪涝过程的水动力效应,以期为流域尺度内科学合理地推进城镇化与山前平原区洪涝管理提供参考。

1 研究区概况

梅溪流域位于我国东南沿海福建省泉州市,东经 118°30'15"~118°32'34",北纬 25°02'53"~25°06'59" (图 1),流域总面积 101 km²,东溪为整个梅溪流域的下边界。根据流域不同区域的 DEM、土地利用类型和洪水风险的差异,将梅溪流域划分为上游山区和下游平原区城镇两部分。上游山区地势较高,为低开发区域,洪水风险较低,土地利用类型主要为林地和耕地;下游平原区即为洪濂镇主城区,具有地势低洼、建筑密集、城镇化进程较快、人口集中、洪水风险较高等特征。此外,根据 ArcGIS 10.2 空间分析工具,将山区分为 5 个子流域(S1~S5),其面积为 1.4~55.1 km²。子流域 S2 和 S5 面积较大,内有天然河道梅溪和四都溪;S1、S3 和 S4 面积较小,无天然河道。一旦发生突发性短时暴雨,上游山区各

子流域会迅速形成骤发洪水,直接影响下游平原区城镇的淹没状况。梅溪流域下游平原区洪濂镇的面积为 5.4 km²,其地表淹没状况会同时受到平原区本地形成的内涝和山区骤发洪水叠加影响。

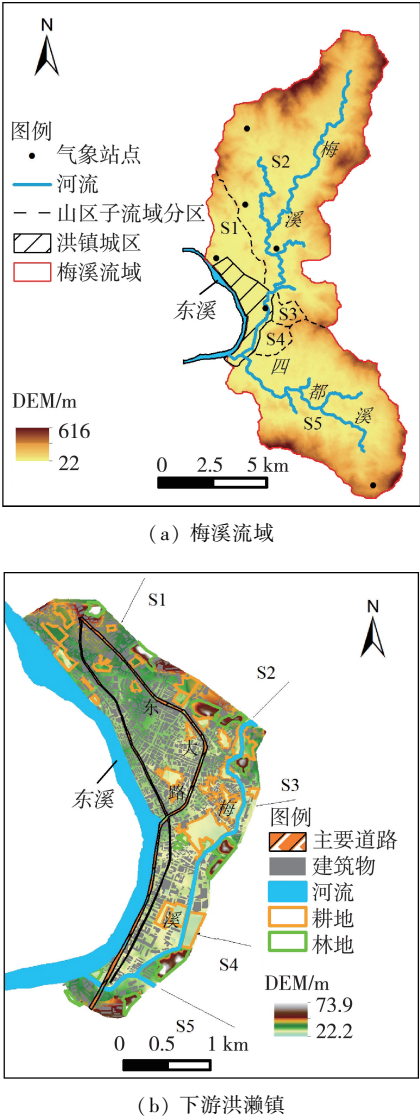


图 1 梅溪流域及下游洪濂镇概况
Fig.1 Overview of the Meixi River Basin and Honglai Town in downstream

2 研究方法与数据来源

2.1 水文-水动力耦合模型

利用已构建并验证的梅溪流域水文-水动力耦合模型计算流域的洪涝过程^[19-20]。其中,上游山区 5 个子流域采用 BTOPMC 水文模型计算,下游平原区城镇借助 FLO-2D 水动力模型计算,城镇地下管网排水系统采用 FLO-2D 内置耦合的 SWMM 模块计算。BTOPMC、FLO-2D 和 SWMM 的控制方程和主要参数参考 Sun 等^[21-23]的研究。上游山区水文模型的网格大小为 30 m×30 m,计算步长为 1 h;下游平原区水动力模型的网格大小为 10 m×10 m,模

拟时长为 30 h, 计算步长为 1s, 建筑物概化方式采用高程法, 即把建筑物看成不过水的实体。耦合模型采用了松散耦合方式, 将水文模型计算的上游山区产汇流结果作为下游平原区水动力模型的边界条件输入。耦合模型已采用 2016 年“莫兰蒂”台风场景验证^[19-20], 模拟最大淹没水深的平均绝对误差为 0.13 m, 平均相对误差为 9.3%, 说明耦合模型可以用于梅溪流域暴雨场景模拟。

2.2 数据来源

通过地理空间数据云平台以及中国科学院南京土壤研究所 1:100 万中国土壤图等数据库, 分别收集了梅溪流域 2002 年和 2018 年 30 m 分辨率的 DEM 数据、土壤数据和土地利用数据(图 2)。结合相关研究, 将梅溪流域土地利用类型分为 5 类: 草地、水域、耕地、林地和城镇建设用地(包括建筑物、街道、其他不透水地面等)^[13]。平原区城镇水动力模拟所需求的数据精度比山区水文模拟的要求更高, 30 m 分辨率的精度远不能满足城镇洪涝模拟的需求。因此, 于 2018 年利用无人机倾斜摄影, 获取了下游平原区洪濂镇高精度航拍图像和 DEM 数据(5 m 分辨率); 同时, 收集了 2002 年下游平原区城镇的遥感图像(5 m 分辨率)。需要说明的是, 2002 年之前的图像分辨率较低, 不能满足山前平原区水动力模拟的要求, 因此本研究只分析 2002—2018 年的城镇化进程。借助 ArcGIS 10.2, 将各土地利用类型数字化后, 得到了流域下游平原区洪濂镇 2002 年和 2018 年的土地利用类型分布(图 3)。

根据《南安市暴雨强度公式修编》, 设计了 6 种不同的降雨重现期的降雨过程线(图 4), 降雨雨型为芝加哥雨型, 雨峰系数为 0.5。

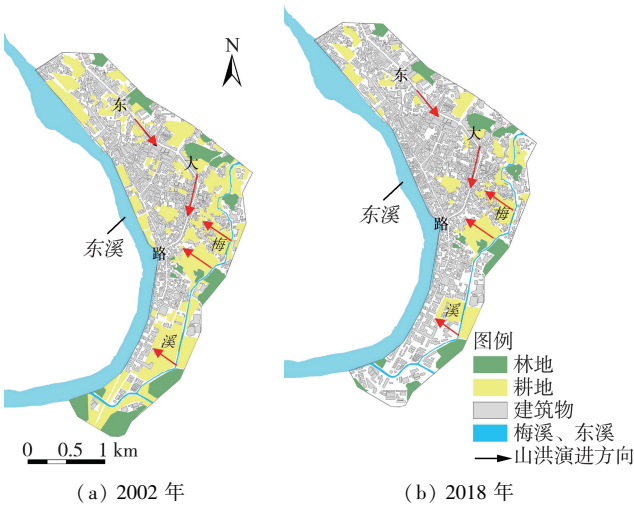


图 3 下游洪濂镇 2002 年和 2018 年土地利用类型
Fig.3 Land use of Honglai Town in downstream in 2002 and 2018

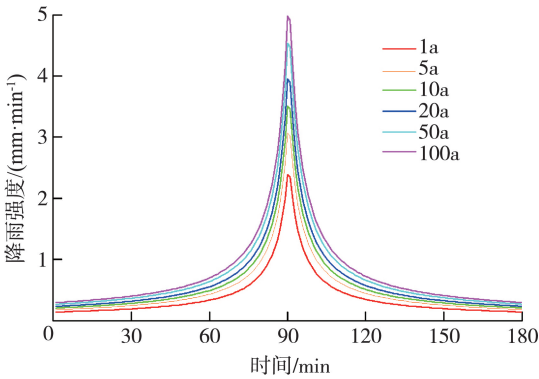


图 4 不同降雨重现期设计降雨过程线
Fig.4 Design rainfall in different return periods

3 结果与分析

3.1 梅溪流域土地利用类型变化

表 1 为 2002 年和 2018 年梅溪流域土地利用类型面积占比情况, 可见, 上游山区子流域 S1、S3 和 S4 的土地利用变化不明显。子流域 S2 和 S5 的耕地和林地面积占流域总面积的比例(简称“面积占比”)显著减少, 而城镇建设用地面积占比由 2002 年的 2.98% (S2) 和 0.87% (S5) 分别增加到 2018 年的 5.72% (S2) 和 2.80% (S5)。另外, 2002—2018 年洪濂镇的城镇建设用地面积占比增加了 1.07%。虽然下游平原区城镇建设用地面积的增量要小于上游山区子流域 S2 和 S5 的增量, 但是由于下游平原区面积(5.4 km²)比山区子流域 S2(55.1 km²)、S5(38.4 km²)的面积小很多, 因此产生的影响较大。具体来说, 洪濂镇的土地利用类型变化主要分布在东溪沿岸、梅溪沿岸和主要道路东大路沿线。

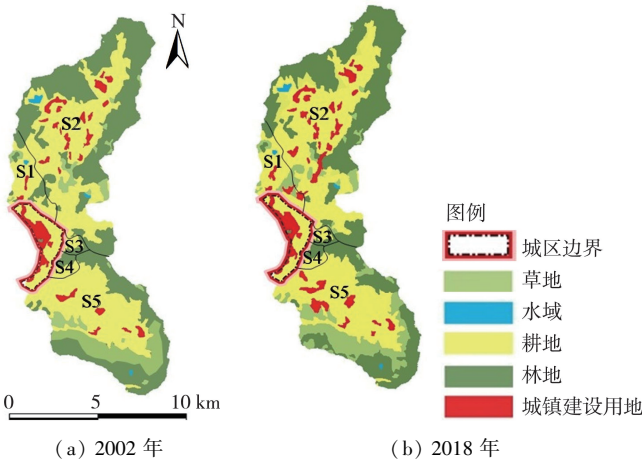


图 2 梅溪流域 2002 年和 2018 年土地利用类型
Fig.2 Land use type in the Meixi River Basin in 2002 and 2018

表1 梅溪流域2002年和2018年土地利用类型面积占比

Table 1 Land use area proportion in the Meixi River Basin in 2002 and 2018

年份	区域	草地/%	水域/%	耕地/%	林地/%	城镇建设用地/%
2002	S1	0.33	0.06	4.44	1.24	0.27
	S2	2.18	0.30	25.35	22.39	2.98
	S3	0.00	0.00	0.81	0.59	0.00
	S4	0.00	0.00	0.97	0.69	0.00
	S5	1.32	0.05	17.83	17.24	0.87
	平原区	0.11	0.06	1.58	0.44	2.87
2018	S1	0.55	0.06	4.10	1.14	0.45
	S2	1.94	0.30	23.75	21.88	5.72
	S3	0.02	0.00	0.81	0.57	0.00
	S4	0.00	0.00	0.98	0.60	0.10
	S5	1.43	0.05	16.10	16.00	2.80
	平原区	0.07	0.06	0.69	0.29	3.94

为更好地识别梅溪流域内上游山区和下游平原区土地利用类型之间的相互转换情况,分别计算了山区和平原区的土地利用转移矩阵(图5)。由图5(a)可见,山区土地利用类型之间相互转换的过程比较复杂:耕地、林地的变化量(转入及转出量)大于城镇建设用地的变化量,三者的变化量分别为1297万 m²、1065 万 m²和642 万 m²。水域的变化量很小,图中未显示其数值。上游山区的城镇建设用地主要来自于耕地转入,转入面积占城镇建设用地转入总面积的41.6 %。下游平原区除城镇建设用地外,其他土地利用类型间的相互转换量均较小。土地利用类型转换基本表现为非城镇建设用地转换为城镇建设用地,城镇建设用地的增量分别来自耕地(26.7 %)、草地(8.2 %)和林地(5.1 %)。

3.2 梅溪流域土地利用类型变化对山区产汇流与平原区淹没状况的影响

利用2002年和2018年的土地利用类型数据计算梅溪流域上游山区5个子流域的产汇流变化,并分别计算了6种设计降雨重现期(1 a、5 a、10 a、20 a、50 a、100 a)下各个子流域形成的骤发洪水流量过程线。由于子流域S1、S3和S4面积较小,并且在2002—2018年土地利用类型的变化不明显,峰值流量的增量不超过2 m³/s。面积相对较大的子流域S2和S5,由于耕地和林地面积减少、城镇建设用地增加,土地利用类型变化对产汇流影响显著。因此,以面积最大的子流域S2为例,图6为2002年和2018年不同重现期下骤发洪水流量过程线,可见,2018年的流量过程线有变高、变瘦和峰现提前的现象,并在高重现期下尤其明显。

表2为不同重现期下S2子流域城镇化对山区产汇流的影响。2002—2018年,随着上游山区的村落数量增多、不透水面积增大,使得S2子流域的径流深、径流系数、流量峰值均增大。不同重现期下,S2子流域的径流深、径流系数和流量峰值增大的范围分别为3.78 ~ 12.44 mm、0.05 ~ 0.08和7.59 ~ 10.07 m³/s;洪峰峰现时间的提前量在0.25 ~ 0.75 h之间。重现期越大,S2子流域洪峰峰现时间的提前量越小。

下游平原区土地利用类型变化对内涝的影响有两方面:①平原区不透水面积增大,使2018年土地利用条件的下渗量比2002年减少了30.8 % ~ 35.4 %;②各土地利用类型及其面积占比改变后引

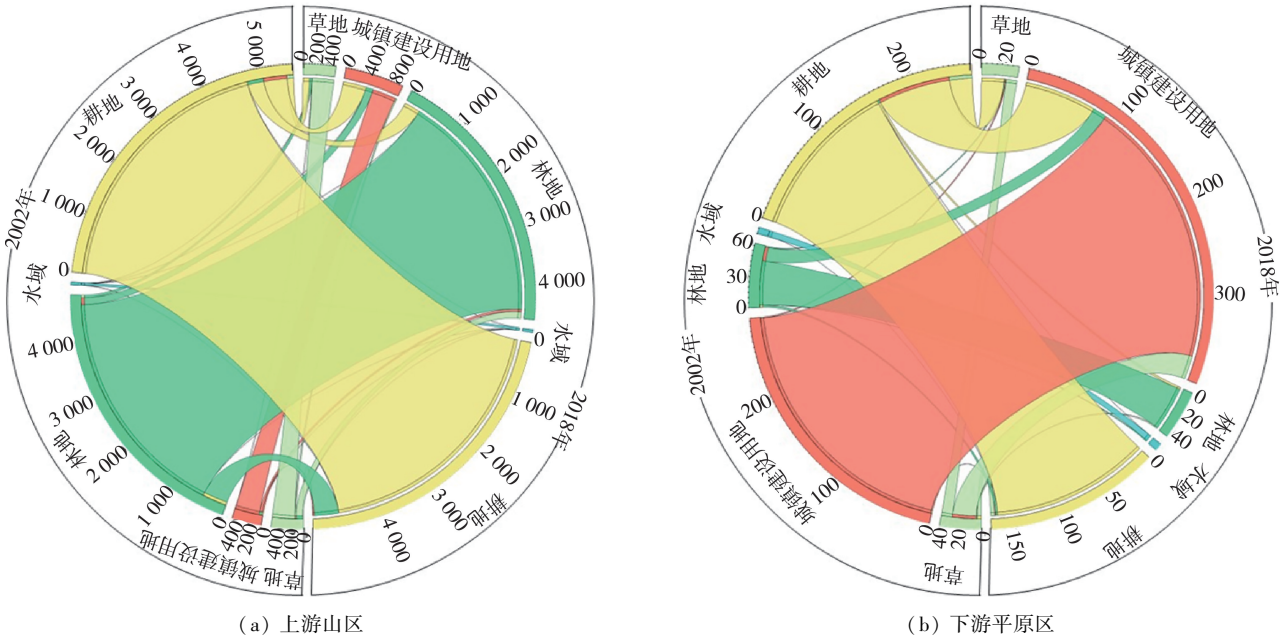
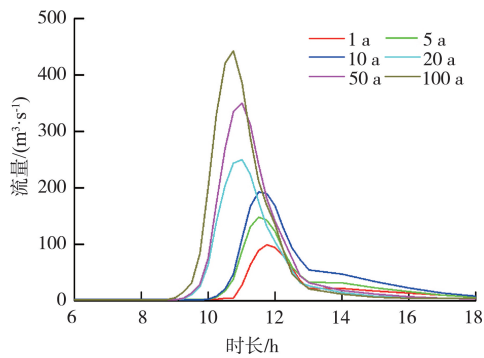
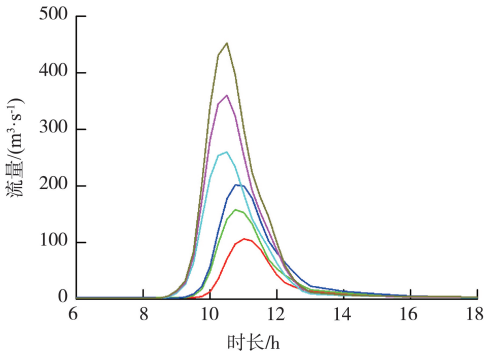


图5 梅溪流域2002—2018年土地利用类型转换(单位:万 m²)

Fig.5 Land use conversion of the Meixi River Basin from 2002 to 2018(unit:10⁴m²)



(a) 2002 年



(b) 2018 年

图 6 S2 子流域不同降雨重现期下骤发洪水流量过程线

Fig. 6 Sudden flood discharge hydrograph under different return periods in S2 sub-basin

表 2 不同降雨重现期下 S2 子流域城镇化对山区产汇流的影响

Table 2 Effect of urbanization on water yielding and runoff routing in mountainous area under different return periods in S2 sub-basin

重现期/a	径流深 增量/mm	径流系 数增量	流量峰 值增量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	峰现时间 提前量/h
1	3.78	0.05	7.59	0.75
5	5.24	0.06	9.47	0.75
10	6.58	0.06	9.22	0.75
20	8.14	0.07	9.71	0.50
50	10.78	0.08	10.76	0.50
100	12.44	0.08	10.07	0.25

起地表糙率减小,使地表洪涝过程的峰现时间提前。由于城镇范围内的地表淹没状况具有较大的空间差异,结合相关城市洪涝模拟研究^[23-24],采用淹没面积、平均最大淹没水深、平均峰现时间和平均淹没历时作为反映地表淹没平均状况和严重程度的相关指标。

表 3 为不同重现期下城市化引起洪涝镇地表洪涝相关指标的变化情况。由表 3 可见,整个梅溪流域的土地利用类型变化使淹没面积、平均最大淹没水深和平均淹没历时增大,平均峰现时间减小。然而,随着重现期增加,淹没面积、平均最大淹没水深、平均峰现时间和平均淹没历时的变化率均降低。例

如,重现期为 1 a 时,2018 年土地利用条件下平均最大淹没水深为 0.206 m,比 2002 年增加了 0.011 m,变化率为 6.03 %;重现期为 100 a 时,2018 年土地利用条件下平均最大淹没水深为 0.815 m,比 2002 年增加了 0.033 m,变化率却为 3.42%。这说明梅溪流域土地利用类型变化带来的影响会在高重现期降雨条件时被削弱,城镇化进程对下游平原区城镇各洪涝相关指标的影响程度由大到小为:平均淹没历时、平均最大淹没水深、淹没面积、平均峰现时间,其中平均淹没历时的变化率最大,说明该变量对流域土地利用类型变化相对更加敏感。

表 3 不同重现期下城市化引起洪涝镇地表洪涝指标的变化情况

Table 3 Variation situation of surface inundation indicators of Honglai Town induced by urbanization under different return periods

重现期/a	平均最大 淹没水深 增加率/%	平均峰 现时间 提前率/%	平均淹没 历时增加 率/%	淹没面积 增加率/%
1	6.04	1.72	12.42	8.22
5	3.92	2.81	8.70	4.31
10	2.59	0.22	7.78	1.95
20	3.29	0.20	5.09	0.04
50	4.15	0.44	4.80	0.51
100	3.42	1.36	3.79	0.96

综上所述,梅溪流域的土地利用类型变化对山区子流域的产汇流过程和平原区地表洪涝过程的影响大致相似。流域城镇化进程增加了上游山区子流域骤发洪水过程线的峰值流量,提前了洪峰峰现时间,同时也增加了下游平原区地表淹没状况的严重性,使得平均峰现时间提前。城市化对洪涝过程和淹没状况有明显放大作用,这一结果与现有研究结论一致^[8-9,12]。随着降雨重现期增大,山区子流域产汇流的相关指标增大,骤发洪水的峰现时间提前量越小,这与赵彦军等^[13-14]的研究结论一致。同时,对于山前平原区城镇,流域城镇化进程引起地表洪涝相关指标的增量越来越大,但变化率也随之减小,说明高重现期降雨条件会削弱土地利用变化带来的影响。这很可能是由不同重现期地表淹没总水量量级的差异引起。在高重现期时,淹没总水量本身极大,由城镇化进程增加的产流量占总流量的比例实际上较小,因而模拟结果的变化不明显。相反,低重现期时,由城镇化引起增加的水量虽然不大,但其本身的洪水量级较低,因而模拟结果的变化率则相对凸显。赵彦军等^[13]得出过类似的结论:随着设计暴雨重现期的增加,城市化对峰现时间的影响逐渐减弱。

3.3 流域尺度土地利用类型变化对山前平原区城镇洪涝过程影响的差异

为有效识别梅溪流域内不同区域(山区和平原

区)土地利用类型变化对地表淹没状况影响的差异,采用控制变量方法设计了相关情景。具体为:情景1使用2002年山区、2002年平原区的土地利用数据;情景2使用2002年山区、2018年平原区的土地利用数据;情景3使用2018年山区、2002年平原区的土地利用数据;情景4使用2018年山区、2018年平原区的土地利用数据。

将6种重现期与4种土地利用情景进行了交叉组合计算,图7为重现期为50a时不同情景下的最大淹没水深空间分布。4个情景计算的平均最大淹没水深分别为0.65m、0.65m、0.67m和0.68m,说明地表淹没状况同时受山区和平原区土地利用类型变

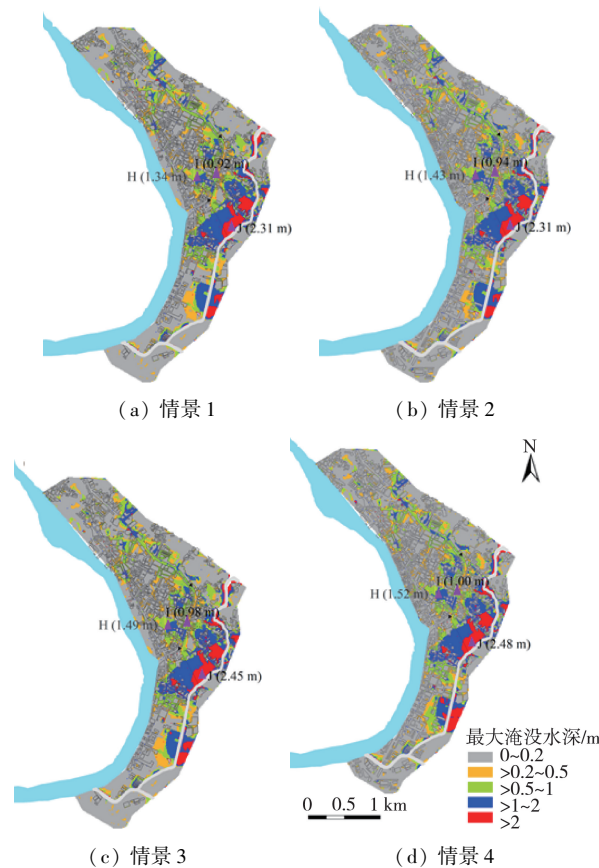


图7 降雨重现期为50a时不同情景下的最大淹没水深空间分布

Fig.7 Distribution of maximum inundation depth with different land use scenarios at return periods of 50 years

化影响。选择洪涝镇主要道路(东大路)的易涝点位H和I以及梅溪河道附近的低洼点位J为例,3个点位的最大淹没水深均显示了相似的变化规律(图7)。

表4为情景2、情景3、情景4相对于情景1计算结果的变化率,可见所有重现期条件下,情景3模拟的平均最大淹没水深比情景2更接近于情景4的模拟结果,表明山区土地利用类型变化对平均最大淹没水深的影响比平原区土地利用类型变化的影响更大。平均峰现时间对不同区域土地利用类型变化的响应和平均最大淹没水深相一致,即山区土地利用类型变化对平均峰现时间的影响大于平原区。不同重现期的计算结果表明,情景3平均峰现时间的模拟结果更接近于情景4,即山区土地利用类型变化主导了平均峰现时间。由于低重现期条件下(<10a),山区土地利用类型变化对子流域产汇流的影响较小,而且梅溪河道的漫堤水量较少,因此低重现期条件下,情景2和情景3计算的平均峰现时间变化率相差不大。因此,山区土地利用类型变化对平原区淹没状况的影响在高重现期条件下(>20a)更加显著。然而,平均淹没历时对流域土地利用结构变化的响应结果与平均最大淹没水深和平均峰现时间相反。6种重现期条件下,情景2的模拟结果比情景3更接近于情景4,说明下游平原区的土地利用类型变化对平均淹没历时的影响更占主导。淹没历时是从地表开始出现淹没水深(大于临界水深0.03m)时开始计算,图8为重现期为50a时不同情景下的地表淹没历时空间分布。由图8可见,点位H、I和J淹没历时的增量也显示了相同的规律,各情景下点位H的淹没历时分别为22.1h、22.7h、22.2h和22.8h。

综上所述,流域上游山区的土地利用类型变化对地表洪涝过程中的平均最大淹没水深和平均峰现时平均峰现时间的影响占主导,而流域下游平原区的土地利用类型变化对平均淹没历时的影响占主导。有研究指出,土地利用格局对洪水的影响十分显著^[15],本文中平原区的城镇建设用

表4 不同情景下地表洪涝指标相对于情景1计算结果的变化情况

Table 4 Variation of surface flood indexes in different scenarios compared with calculated results in scenario 1									
重现期/a	平均最大淹没水深增加率/%			平均峰值现时间提前率/%			平均淹没历时增加率/%		
	情景2	情景3	情景4	情景2	情景3	情景4	情景2	情景3	情景4
1	2.61	5.09	5.69	1.05	1.00	1.69	10.47	1.47	11.05
5	1.90	3.24	3.77	1.00	0.95	1.50	7.70	3.29	8.00
10	2.23	2.03	2.52	1.13	1.17	1.32	4.48	0.46	7.22
20	2.80	2.82	3.19	0.09	0.12	0.20	3.33	3.56	4.84
50	0.86	3.10	4.60	0.12	0.39	0.53	5.90	1.70	6.80
100	0.36	2.76	3.31	0.09	0.16	0.20	2.51	1.99	3.65

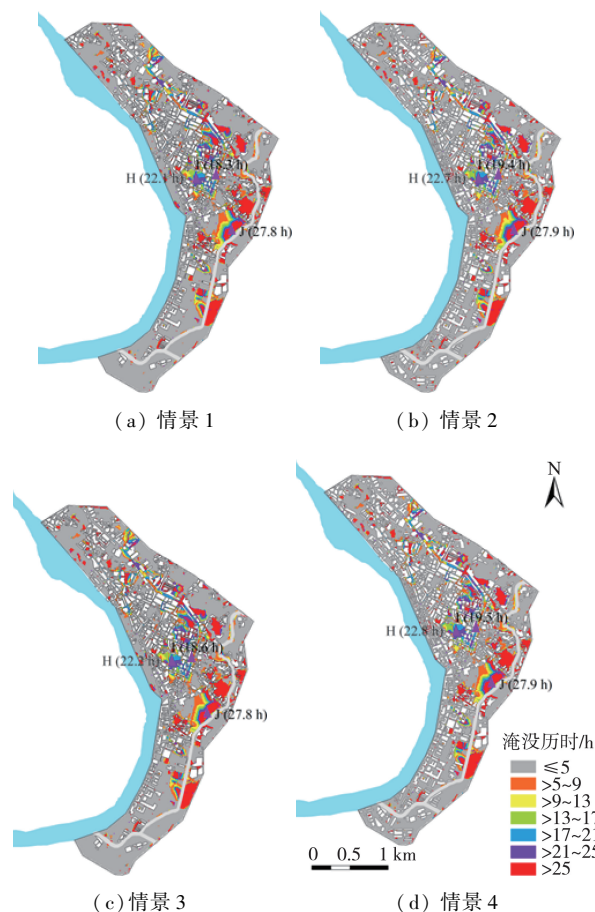


图8 降雨重现期为50 a时不同情景下地表淹没历时空间分布
Fig.8 Distribution of inundation time with different land use scenarios at return periods of 50 years

增加使下渗率减小了30%以上,进而增大了内涝水量。然而,由于上游山区和下游平原区面积的巨大差异,山前平原区城镇的地表淹没状况主要由山区骤发洪水主导,使得内涝增加的水量远小于山区子流域骤发洪水增大的洪量。因此,山区土地利用类型变化对地表淹没总水量的改变占主导作用,从而主要影响了平均最大淹没水深。对于平均峰现时间来说,下游平原区土地利用类型变化使内涝时的峰现时间提前,但并未主导地表平均峰现时间。这是因为山区骤发洪水会在下游平原区城镇内演进并将本地降雨形成的内涝状况覆盖,因而山区骤发洪水演进并造成淹没的区域和范围内,其峰现时间仍然受上游山区主导。而高重现期条件下,山区骤发洪水峰值流量和峰现时间的增量比低重现期时更大,使得平均峰现时间对山区土地利用类型变化的响应更加显著。另外,下游平原区城镇建设用地增加,使得内涝发生的时间提前并缩短了内涝的峰现时间^[7, 14]。山前平原区城镇内涝发生的时间比山洪演进到下游并造成淹没的时间更早,因而山区骤发洪水峰现时间的变化对平均淹没历时并未产生影响。下游平原区城镇比上游山区更接近整个梅溪流

域的出口,已有关于流域尺度内土地利用类型变化引起洪涝过程差异的研究指出,距离流域出口更近的地方不透水面积增大会使得流域出口的峰现时间更早^[25],因而平原区土地利用类型变化使得内涝发生的时间更早、淹没历时更长,从而印证了本文的结论。

4 结论

a. 遥感数据和土地利用数据分析表明,2002—2018年梅溪流域上游山区和下游平原区的城镇建设用地分别增加了5.0%和1.1%,并主要由耕地和林地转换而来。

b. 2002—2018年流域内城镇建设用地增加,山区子流域的峰值流量和径流系数均增大,山前平原区的地表淹没状况更加严重。反映地表淹没状况的各相关指标对流域土地利用变化的敏感性由大到小排序为:平均淹没历时、平均最大淹没水深、淹没面积、平均峰现时间。降雨重现期增大后,流域土地利用类型变化带来的影响会被削弱。

c. 流域内土地利用类型变化对山前平原区洪涝过程的影响不同:上游山区城镇建设用地增加使山区骤发洪水的峰值流量增大、峰现时间提前,主要影响了地表平均最大淹没水深和平均峰现时间;下游平原区城镇建设用地增加使内涝发生的时间提前,主要影响了地表平均淹没历时。

参考文献:

- [1] 郑德凤, 高敏, 李钰, 等. 基于GIS的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3):1-8. (ZHENG Defeng, GAO Min, LI Yu, et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3):1-8. (in Chinese))
- [2] 张文婷, 刘永志, 张行南, 等. 联安围防洪保护区洪水演进模拟分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(2):1-6. (ZHANG Wenting, LIU Yongzhi, ZHANG Xingnan, et al. Flood routing simulation and analysis of Lian'anwei flood protection zone[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2):1-6. (in Chinese))
- [3] 黄国如, 罗海婉, 卢鑫祥, 等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J]. 水资源保护, 2020, 36(6):1-6. (HUANG Guoru, LUO Haiwan, LU Xinxiang, et al. Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6):1-6. (in Chinese))
- [4] 王振亚, 姚成, 董俊玲, 等. 郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3):17-22. (WANG Zhenya, YAO

- Cheng, DONG Junling, et al. Precipitation characteristic and urban flooding influence of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3):17-22. (in Chinese))
- [5] 宋晓猛, 张建云, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: II. 城市雨洪模拟与管理[J]. 水科学进展, 2014, 25(5):752-764. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: II. urban stormwater modeling and management[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(5): 752-764. (in Chinese))
- [6] 柳杨, 范子武, 谢忱, 等. 城镇化背景下我国城市洪涝灾害演变特征[J]. 水利水运工程学报, 2018(2): 10-18. (LIU Yang, FAN Ziwu, XIE Chen, et al. Study on evolvement law of urban flood disasters in China under urbanization[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(2): 10-18. (in Chinese))
- [7] 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 Jianyun, WANG Yintang, HE Ruimin, et al. Discussion on the urban and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 485-491. (in Chinese))
- [8] BAYAZIT Y, KOC C, BAKIS R. Urbanization impacts on flash urban floods in Bodrum Province, Turkey[J]. Hydrological Sciences Journal, 2021, 66(1): 118-133.
- [9] PANOS C, HOGUE T S, GILLIOM R, et al. High-resolution modeling of infill development impact on stormwater dynamics in Denver, Colorado[J]. Journal of Sustainable Water in the Built Environment, 2018, 4(4):04018009.
- [10] ZHOU Q, LENG G, SU J, et al. Comparison of urbanization and climate change impacts on urban flood volumes: importance of urban planning and drainage adaptation[J]. Science of the Total Environment, 2019, 658:24-33.
- [11] 高倩, 赵强, 杨梦林, 等. 气候和土地利用变化对大汶河流域径流的影响[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2019(5):439-445. (GAO Qian, ZHAO Qiang, YANG Menglin, et al. Impact of climate change and land use on Runoff in the Dawen River Basin[J]. Journal of Jinan University(Science & Technology, 2019(5): 439-445. (in Chinese))
- [12] 赵刚, 史蓉, 庞博, 等. 快速城市化对产汇流影响的研究:以凉水河流域为例[J]. 水力发电学报, 2016, 35(5): 55-64. (ZHAO Gang, SHI Rong, PANG Bo, et al. Impact of urbanization on rainfall-runoff processes in urban catchment: case study for Liangshui River Basin [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(5): 55-64. (in Chinese))
- [13] 赵彦军, 徐宗学, 赵刚, 等. 城市化对济南小清河流域产汇流的影响研究[J]. 水力发电学报, 2019, 207(10): 37-48. (ZHAO Yanjun, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Impact of urbanization on regional rainfall-runoff processes in the Xiaoqing River Basin, China[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 207(10): 37-48. (in Chinese))
- [14] YAO L, WEI W, CHEN L. How does imperviousness impact the urban rainfall-runoff process under various storm cases? [J] Ecological Indicators, 2016, 60: 893-905.
- [15] 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):36-46. (SUN Yalian, LI Jicheng, YANG Dong, et al. Impact of land use change on catchment stormwater flooding process based on a hydrodynamic model[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2020, 31(6):36-46. (in Chinese))
- [16] 常晓栋, 徐宗学, 赵刚, 等. 山前平原型城市雨洪模拟与应用:以济南市为例[J]. 水力发电学报, 2018, 37(5): 107-116. (CHANG Xiaodong, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Simulation of urban rainfall-runoff in piedmont cities: case study of Jinan City, China [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(5):107-116. (in Chinese))
- [17] 程涛, 徐宗学, 洪思扬, 等. 济南市山前平原区暴雨内涝模拟[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(2):246-253. (CHENG Tao, XU Zongxue, HONG Siyang, et al. Simulation rainstorm waterlog in piedmont plains in Jinan City [J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2018, 54(2): 246-253. (in Chinese))
- [18] MA M, WANG H, JIA P, et al. Investigation of inducements and defenses of flash floods and urban waterlogging in Fuzhou, China, from 1950 to 2010[J]. Natural Hazards, 2018, 91(3): 803-818.
- [19] 蒋卫威, 鱼京善, 赤穗良辅, 等. 基于水文水动力耦合模型的山区小流域洪水预报[J]. 水文, 2020, 40(5): 28-35. (JIANG Weiwei, YU Jingshan, AKOH Ryosuke, et al. Flood forecasting of small watershed in mountainous area based on hydrological-hydrodynamic coupling model[J]. Journal of China hydrology, 2020, 40(5):28-35. (in Chinese))
- [20] 蒋卫威, 鱼京善, 陈基培, 等. 排水管网系统堵塞与拍门对城市水动力过程的影响研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(1):143-150. (JIANG Weiwei, YU Jingshan, CHEN Jipei, et al. Impact of discharge pipe system clogging and flap gate on urban hydrodynamic process [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2021, 32(1):143-150. (in Chinese))

- [J]. Computer Science, 2022, 49 (Sup1): 93-99. (in Chinese))
- [23] WANG J, ZUCKER J D. Solving multiple-instance problem;a lazy learning approach [M]. Morgan kaufmann Publishers Inc. ,2000;1119-1126.
- [24] ZHANG M L,ZHOU Z H. Adapting RBF neural networks to multi- instance; learning [J]. Neural Processing Letters, 2006 ,23(1): 1-26.
- [25] 张兆安. 基于非结构网格 GPU 加速技术的二维水动力数值模型[D]. 西安:西安理工大学,2021.
- [26] 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. (HOU Jingming, LI Guiyi, LI Guodong, et al. Application of efficient high-resolution hydrodynamic model to simulations of flood propagation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37 (2): 96-107. (in Chinese))
- [27] 侯精明,李东来,王小军,等. 建筑小区尺度下 LID 措施前期条件对径流调控效果影响模拟[J]. 水科学进展, 2019, 30(1): 45-55. (HOU Jingming, LI Donglai, WANG Xiaojun, et al. Effects of initial conditions of LID measures on runoff control at residential community scale [J]. Advances in Water Science, 2019, 30 (1): 45-55 (in Chinese))
- [28] 房亚军,于川淇,金鑫,等. 基于 SWMM-CCHE2D 单向耦合模型的山地海绵城市内涝管控效果研究 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54 (10): 898-906. (FANG Yajun, YU Chuanqi, JIN Xin, et al. Research on water-logging control effect of mountain sponge city based on SWMM-CCHE2D unidirectional coupling model [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(10): 898-906. (in Chinese))
- [30] 杨东,侯精明,李东来,等. 基于扩散波方法的管网排水过程数值模拟[J]. 中国给水排水, 2020, 36(15): 113-120. (YANG Dong, HOU Jingming, LI Donglai, et al. Numerical simulation of pipe network drainage process based on diffusion wave method [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(15): 113-120. (in Chinese))
- [31] 齐文超,侯精明,刘家宏,等. 城市湖泊对地表径流致涝控制作用模拟研究 [J]. 水力发电学报, 2018, 37(9): 8-18. (QI Wenchao, HOU Jingming, LIU Jiahong, et al. Lake control on surface runoff causing urban flood inundation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(9): 8-18. (in Chinese))
- [32] 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(15):126-149.
- [33] 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 Jingming, WANG Run, LI Guodong, 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))
- [34] HOU J, LIANG Q, ZHANG H, et al. An efficient unstructured MUSCL scheme for solving the 2D shallow water equations[J]. Environmental Modelling and Software, 2015, 66:131-152.

(收稿日期:2022-05-05 编辑:王芳)

(上接第 81 页)

- [21] SUN W, WANG J, LI Z, et al. Influences of climate change on water resources availability in Jinjiang Basin, China [J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014 (282):908349.
- [22] GRIMALDI S, PETROSELLI A, ARCANGELETTI E, et al. Flood mapping in ungauged basins using fully continuous hydrologic-hydraulic modeling[J]. Journal of Hydrology, 2013, 487(2): 39-47.
- [23] CHEN W, HUANG G, HAN Z, et al. Urban inundation response to rainstorm patterns with a coupled hydrodynamic model: a case study in Haidian Island, China [J]. Journal of Hydrology, 2018, 564: 1022-1035.
- [24] XING Y, SHAO D, MA X Y, et al. Investigation of the importance of different factors of flood inundation modeling applied in urbanized area with variance-based global sensitivity analysis [J]. The Science of the Total Environment, 2021, 772(10):145327.
- [25] YANG G X, BOWLING L C, CHERKAUER K A, et al. The impact of urban development on hydrologic regime from catchment to basin scales [J]. Landscape & Urban Planning, 2011, 103(2):237-247.

(收稿日期:2022-06-07 编辑:王芳)

