

基于 SWMM 的陂塘系统雨洪调蓄能力及应用研究

姜芊孜¹, 俞孔坚², 王志芳²

(1. 山东建筑大学 建筑城规学院, 山东 济南 250101; 2. 北京大学 建筑与景观设计学院, 北京 100871)

摘要: 陂塘系统是山地城市重要的绿色基础设施和“海绵体”。基于陂塘景观的水文过程,利用 SWMM 模型,建立了场地尺度陂塘系统的暴雨径流模型。以重庆裕民村为例,利用 2000 年—2012 年的降雨数据和不同重现期下 24 h 设计降雨模拟研究了陂塘系统的雨洪调蓄能力。在保留陂塘系统的前提下,以居住用地开发为例,分别模拟了高、中、低居住密度在小流域上、中、下游布局的流域地表径流总量和峰值径流量。结果发现,由塘和水田构成的陂塘系统能够抵御百年一遇的 24 h 设计降雨。13 年的长期历史降雨数据模拟结果显示,陂塘系统对场地径流控制率高达 75% 以上。以保留场地内的陂塘系统为前提,高密度上游布局开发对整个场地的水文影响最小。最后,在流域、城市和场地尺度上分别提出了陂塘景观未来应用的规划设计策略。

关键词: 陂塘景观; 雨洪调蓄; 转型应用; 海绵城市

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)11-0132-07

Rainwater Storage and Regulation Capacity of Beitang System Based on SWMM and Its Application

JIANG Qian-zi¹, YU Kong-jian², WANG Zhi-fang²

(1. School of Architecture and Urban Planning, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. College of Architecture and Landscape Architecture, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Beitang system is an important part of green infrastructure and spongy bodies of the mountainous city. A stormwater runoff simulation model of site scale Beitang system was developed by using SWMM model based on hydrological process of Beitang landscape. Taking Yumin village in Chongqing as an example, rainwater storage and regulation capacity of Beitang system was simulated by using the rainfall datas from 2000 to 2012 and designed 24-hour storm events under different return periods. On the premise of preserving Beitang system and taking residential land development as an example, the total runoff volume and peak runoff rate of high, medium and low residential density in upstream, midstream and downstream layout of the small watershed were simulated respectively. It was found that Beitang system which consisted of ponds and paddy fields could withstand a designed 24-hour storm which happens once in a hundred years. The simulated results obtained from 13 years of long-term historical rainfall data showed that Beitang system had a runoff control rate of over 75%. On the premise of preser-

ving Beitung system in the site, the development of high density upstream layout had the minimal hydrological impact on the whole site. At last, the planning and design strategies for the future application of Beitung landscape were put forward from different perspectives of watershed, cities and fields.

Key words: Beitung landscape; rainwater storage and regulation; application; sponge city

天然的冲沟、溪流,长年耕作的水田,以及小型、分散的水塘和洼地是山地城市独具特色的雨洪管理系统,这些数量众多且分布广泛的山坪塘、山湾塘以及水田所构成的陂塘系统成为未来构建山地“海绵城市”的重要“海绵体”。然而,快速城市化使广布在农村地区的陂塘景观大量消失,增大了山地城市的内涝风险,加剧了城乡结合部农村及偏远山村的用水缺乏,同时也导致了乡土动植物生境和游憩机会的丧失。在乡村城市化的过程中,如果能够充分利用这些“海绵体”进行雨水的下渗、滞蓄、净化和回用,剩余部分再通过市政管网排出,能够大大减少建设排水管网和钢筋混凝土水池的工程量,有效提高城市排水系统的标准,减缓城市内涝的压力。另一方面,如果能将小型陂塘系统与城市绿地、园林景观水体相结合,通过具有净化能力的湿地植物配置与设计,能够提高城市的自我净化能力,大幅减少水环境污染的治理费用。

已有的雨洪管理系统的构建思路多是在一定设计暴雨强度下,通过对比开发前后场地的峰值径流量,来确定雨洪管理设施需要削减的径流体积和水质捕获体积,从而确定雨洪管理设施的规模。而对于场地中已存在如陂塘系统这种可利用的雨洪管理设施的情况却缺乏研究,探讨建设布局如何与现有的陂塘系统相协调的研究尚不多见。为此,笔者利用SWMM模拟和预景方法,在场地尺度上定量研究陂塘系统的雨洪调蓄能力;在保留场地内部陂塘系统的前提下,提出不同的场地居住区开发预景并进行模拟,确定对场地水文影响最小的开发预景,以期对存在陂塘系统的场地开发提供借鉴,帮助设计师和决策者选取最佳的规划布局方案。

1 研究区域概况与SWMM模型构建

研究区域位于重庆两江新区后河流域的裕民村,场地总面积约为71 hm²。根据遥感影像解译与场地实地踏勘,研究区内主要土地类型有农村聚落、疏林草地、水田、旱地及水塘,面积分别为19.98、14.6、17.04、0.875、18.51 hm²,占比分别为28.14%、20.56%、24.00%、1.23%、26.07%。村内

具有较为完整的陂塘系统,聚落分布在冲沟和冲田的上游,5个连续的陂塘分布在研究区下游,还有若干小型陂塘散布在聚落之中。聚落及周边疏林草地的地表径流通常先流入水田,后汇入下游的陂塘。有些聚落中散布小陂塘,不透水地表产生的地表径流会优先汇入其中。

1.1 子流域概化

山地城市地形起伏,坡度变化较大。为方便进行子流域概化,将场地简化为农村聚落、疏林草地、水田和旱地4种土地利用类型。首先利用地理信息系统(GIS)和研究区的数字化高程地图(DEM),进行子流域划分,再结合土地利用类型进行调整,得到46个子汇水单元(见图1)。将流域下游5个连续的陂塘视为蓄水池,通过低堰相连接。除去特别干旱的年份和季节,水稻田内一般都有水,具有稳定的下渗率,因此可将水田视为浅水塘。水田之间以及水田与水塘之间通过土质低堰相连。除了周边小流域的地表径流之外,水田和水塘还需要承接田面及塘面的雨水,因此还需要设置与水田、水塘面积相同的子流域。



图1 场地SWMM概化模型

Fig.1 Conceptual model of site by SWMM

1.2 参数选择

SWMM模型参数均根据场地实际条件,结合国内外相关研究文献进行设定。其他参数均按照《暴雨洪水管理模型——EPA SWMM用户教程》中的推荐值进行设置。SWMM模型的构建包括如下模块:

① 雨量计与气候编辑器

模型中的雨量计分为两种类型。一种是2000

年—2012年的逐日降雨数据,用于模拟场地的长期产流过程及陂塘系统的长期调蓄表现。逐日降雨数据来源于中国气象科学数据共享服务网中国地面气候资料日值数据集(V3.0)重庆沙坪坝气象站。另一种是不同重现期($P=1、5、10、20、50、100$ 年)下的24 h设计暴雨,用于模拟场地在单次暴雨下的峰值径流以及陂塘系统对峰值径流的延迟作用。模型中的气候编辑器需要录入2000年—2012年的逐日平均温度以及逐月平均日蒸发量和平均风速。

② 子汇水单元

利用Google earth遥感影像截图,数字化子汇水区内部的不透水面面积(以建筑屋顶、硬化庭院和不透水道路为主),得到每一个子汇水区内部的不透水面比例。利用GIS中的Slope命令对DEM数据进行分析,取平均坡度作为每一个子汇水区的坡度。利用SWMM用户手册中所推荐的特征宽度的计算方法,依据垂直于坡面漫流方向的流域平均宽度确定汇流宽度。

SWMM模型中的入渗模型采用Green Ampt模型,该模型能够反映土壤下渗能力随其饱和度变化而变化的过程。根据两江新区内部的土壤类型分析,裕民村内土壤类型多为黄壤性土。根据参考文献中黄壤土的机械组成粒径范围百分比,将卡庆斯基制转换为美国制粒径分级标准,可知该土壤属于粉沙质粘壤土^[1,2]。依据SWMM用户手册中提供的土壤属性表,得到该类土壤的吸入水头为270 mm、导水率为1.02 mm/h。在干燥状态下初始亏损为土壤孔隙率与土壤产水能力之差,经计算为0.129。

模型中透水地面与不透水地面的曼宁系数及洼地蓄水根据SWMM手册查表与重庆相关研究文献中的参数综合确定。研究表明,山地城市平均坡度大,滞水能力差,滞水深度值小于同种土地覆盖下的平原城市模型参数^[3]。在山地城市排水系统模型中,透水洼地蓄水为5.1~6.9 mm,不透水洼地蓄水为0.9~1 mm,透水曼宁系数为0.38~0.42,不透水曼宁系数为0.018~0.023^[3]。模型中设定透水洼地蓄水为6 mm,不透水洼地蓄水为1 mm;不透水曼宁系数为0.2,透水曼宁系数为0.4。模型中采用的汇流路径为Pervious,即径流从不透水区向透水区流动,交换比例设为50%。

③ 蓄水池与堰

SWMM中将陂塘和水田都概化为蓄水池。根

据重庆地区山坪塘工程整治技术标准(见表1),要求坝顶宽度 ≥ 2.5 m,土石坝、堆石坝的上、下游坝坡坡比(多级坝坡指平均坡比)不小于表1中的要求。由于研究区内陂塘位于下游,且护坡为堆石、砌石质边坡,坝高 < 5 m,故取坝坡的比值为1:1.30。场地内除塘1和塘5深度为2 m外,其余均为1.5 m。

表1 土石坝、堆石坝坝坡要求

Tab.1 Slope requirements of earth-rock dam and rock-fill dam

| 边坡类型 | 坝高/m | 上游坝坡 | 下游坝坡 |
|----------|------|--------|--------|
| 土质边坡 | 5~6 | 1:2.00 | 1:1.75 |
| | <5 | 1:1.75 | 1:1.50 |
| 堆石、砌石质边坡 | 5~6 | 1:1.60 | 1:1.50 |
| | <5 | 1:1.40 | 1:1.30 |

假设现有水面面积是水深为1 m时的面积,根据表1,逐一设置每个陂塘蓄水池的蓄水函数(深度-面积)。将水田视为浅蓄水池,蓄水池深度为田埂的高度,约为30 cm。参考四川省水稻深蓄雨水节水灌溉控制水层深度(秸秆覆盖)中的适宜灌溉水层下限,确定1月份水田中的初始水深为零,降雨后的蓄水上限为150 mm,由降雨深蓄限(90 mm)与适宜灌溉水层上限(60 mm)相加得到。水深超过15 cm后产生溢流。

水田之间及水田与水塘之间的堰宽为1 m,堰高为30 cm,水深超过15 cm后产生溢流。连接陂塘的堰,堰长根据遥感影像逐一测量得到,陂塘水深超过1.2 m或1.5 m(塘1)后产生溢流。

1.3 模型验证

所选区域属于乡村小流域,缺乏长期连续的水量监测数据,难以利用实际数据进行率定,仅能采用综合径流系数比较的方法验证模型的合理性。根据SWMM对场地现状13年连续降雨数据的模拟结果,得到各个汇水单元的径流系数,利用面积加权计算出场地的综合径流系数约为0.176。根据《室外排水设计规范》(GB 50014—2006),农村聚落的径流系数取0.4、疏林草地取0.1、旱地取0.2、水田为0.05,利用面积加权计算得到场地的综合径流系数约为0.192,二者误差约为8%。

2 陂塘系统雨洪调蓄能力模拟

2.1 场地现状与开发前的对比

长时期的降雨数据模拟能够更好地说明陂塘系统的雨洪调蓄能力。因此,研究首先模拟了2000年—2012年逐日降雨条件下6种不同情景的水文

情况。情景1:场地开发前仅有林地存在;情景2:场地开发前仅有林地和水塘存在;情景3:场地开发前有林地、水田和水塘共同构成的陂塘系统存在;情景

4:场地现状中没有水田、陂塘系统;情景5:场地现状中没有水田;情景6:场地现状(存在水田和水塘共同构成的陂塘系统)。模拟结果如表2所示。

表2 2000年—2012年降雨数据模拟下不同用地情景的水文特征

Tab.2 Hydrological characters of different land use scenarios under 13 years' rainfall data (2000-2012)

| 项 目 | 地表径流深度/mm | 地下水回补量/mm | 蒸发量/mm | 外部出流量/ 10^6 L | 平均出流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ | 最大峰值径流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------------|---|---|
| 开发前 | 情景1 | 1 433.46 | 12 171.01 | 307.99 | 1 017.84 | — |
| | 情景2 | 1 432.76 | 12 171.99 | 308.58 | 706.38 | 0.340 |
| | 情景3 | 1 339.04 | 12 256.47 | 318.14 | 228.56 | 0.177 |
| 开发后 | 情景4 | 1 676.67 | 11 751.79 | 483.42 | 1 190.53 | — |
| | 情景5 | 1 637.64 | 11 811.14 | 463.98 | 811.25 | 0.291 |
| | 情景6 | 1 488.23 | 11 947.12 | 478.01 | 241.58 | 0.155 |

在长历时降雨条件下的模拟结果显示,陂塘系统对于场地的地表径流量有显著的削减作用。开发前,场地外部出流量由 $1\ 017.84 \times 10^6$ L 下降至 228.56×10^6 L, 削减了 77.54%; 开发后,场地外部出流量由 $1\ 190.53 \times 10^6$ L 下降至 241.58×10^6 L, 削减了 79.70%。利用模型出水口的径流总量和场地的地表径流量,可以计算陂塘系统对地表径流的控制率。开发前、后陂塘系统对径流的控制率分别为 75.96% 和 77.14%。开发后情景中由于增加了农村居民点,地表径流量增大,陂塘系统的控制率也略有提高。

对比情景2与情景3,场地的平均出流量由 $0.340 \text{ m}^3/\text{s}$ 降至 $0.177 \text{ m}^3/\text{s}$, 最大峰值径流量由 $1.993 \text{ m}^3/\text{s}$ 降至 $1.076 \text{ m}^3/\text{s}$, 减少了 46.01%。开发后对比情景5与情景6,出水口最大峰值径流量由 $2.003 \text{ m}^3/\text{s}$ 降至 $1.079 \text{ m}^3/\text{s}$, 减少 46.13%。这说明在山坳处开辟层层水稻田和水塘能够有效地削减洪峰。分别对比开发前后的3种情景,发现与场地开发前的水文特征相比,开发后的场地地表径流量和蒸发量增大,地下水回补量减少。然而,由于水稻田和水塘组成的陂塘系统的存在,开发后的现状用地布局的系统最大峰值径流量仅为 $1.079 \text{ m}^3/\text{s}$, 比开发前(场地中仅有林地和水塘)的系统最大峰值径流量($1.993 \text{ m}^3/\text{s}$)减少了 $0.914 \text{ m}^3/\text{s}$, 平均出流量也由 $0.340 \text{ m}^3/\text{s}$ 减少到 $0.155 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

长期降雨数据模拟结果表明,陂塘系统可有效削减开发后场地出水口的平均出流量和峰值径流量,减少了农村居民点开发对流域水环境的影响。

为研究单次设计暴雨下陂塘系统对洪峰的延迟和削减效果,通过情景2、3、5和6,模拟了在100年

一遇24 h设计暴雨下的洪水过程,结果见图2。对比情景2与情景3,场地峰现时间由10:05延迟到10:15,峰值流量由 $13.80 \text{ m}^3/\text{s}$ 降低至 $10.60 \text{ m}^3/\text{s}$ 。对比情景5与情景6,场地峰现时间由10:00延迟到10:10,峰值流量由 $14.28 \text{ m}^3/\text{s}$ 减少至 $11.44 \text{ m}^3/\text{s}$ 。这说明由水田和水塘组成的陂塘系统能够有效延迟峰现时间、削减峰值流量。

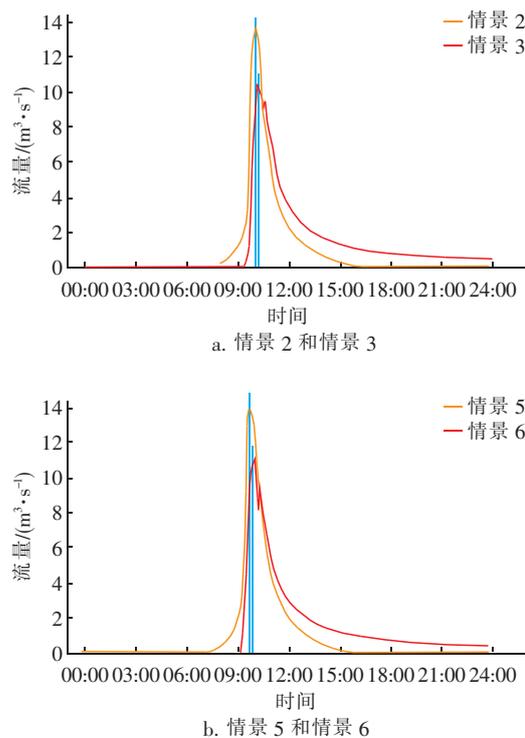


图2 100年一遇24 h设计暴雨下陂塘系统对洪峰的延迟和削减效果

Fig.2 Peak runoff delay and reduction of Beitang system under designed 24-h storm event with return period of one hundred years

2.2 陂塘系统的径流控制能力

在不同重现期 24 h 设计降雨条件下模拟场地的产流情况,结果表明,陂塘系统对场地地表径流的控制率在 63% ~ 70% 之间(见表 3)。对场地现状中陂塘系统的洪水时长进行统计,发现在 1 年一遇 24 h 设计降雨下,水田 T1 和 T3 会发生洪水溢流;从 1 年一遇到 50 年一遇的 24 h 设计降雨条件下,5 个水塘的洪水时长均为零,说明水塘系统不会发生洪水溢流;在百年一遇 24 h 设计暴雨下,塘 P5 会发生洪水溢流,持续时间为 0.05 h(见表 4)。由此表明,场地中现存的陂塘系统能够应对百年一遇的 24 h 设计暴雨。实地调研发现该场地从未发生过洪涝灾害,可以从侧面说明模拟结果符合实际情况。

表 3 不同重现期 24 h 设计降雨下场地现状产流特征

Tab. 3 Runoff characters of site under designed 24-h rainfall with different return periods

| P/年 | 总降雨/mm | 高峰降雨/(mm·min ⁻¹) | 径流深度/mm | 平均径流量/(m ³ ·s ⁻¹) | 高峰径流量/(m ³ ·s ⁻¹) | 径流控制率/% |
|-----|--------|------------------------------|---------|--|--|---------|
| 1 | 184.21 | 1.64 | 117.00 | 0.506 | 1.232 | 66.21 |
| 5 | 265.71 | 2.36 | 194.76 | 0.804 | 2.006 | 63.52 |
| 10 | 300.81 | 2.67 | 228.64 | 0.865 | 2.389 | 65.24 |
| 20 | 335.91 | 2.98 | 262.65 | 0.921 | 2.747 | 66.74 |
| 50 | 382.32 | 3.40 | 307.76 | 0.995 | 3.197 | 68.30 |
| 100 | 417.42 | 3.71 | 341.97 | 1.051 | 3.492 | 69.24 |

表 4 不同重现期 24 h 设计降雨下塘和田的洪水历时

Tab. 4 Flooded duration of ponds and paddy fields under designed 24-h rainfall with different return periods h

| 陂塘系统 | | P = 1 年 | P = 5 年 | P = 10 年 | P = 20 年 | P = 50 年 | P = 100 年 |
|------|----|---------|---------|----------|----------|----------|-----------|
| | | 田 | T1 | 1.78 | 7.43 | 9.53 | 11.80 |
| | T2 | — | 2.42 | 3.80 | 4.95 | 6.45 | 7.63 |
| | T3 | 8.23 | 13.20 | 13.60 | 13.87 | 14.10 | 14.25 |
| | T4 | — | — | 3.63 | 6.73 | 9.73 | 11.90 |
| | T5 | — | 12.12 | 12.95 | 13.40 | 13.75 | 13.92 |
| | T6 | — | 3.07 | 3.88 | 4.68 | 5.87 | 6.90 |
| | T7 | — | 1.00 | 2.08 | 2.82 | 3.68 | 4.35 |
| | T8 | — | 1.05 | 1.58 | 2.02 | 2.57 | 3.00 |
| 塘 | P1 | — | — | — | — | — | — |
| | P2 | — | — | — | — | — | — |
| | P3 | — | — | — | — | — | — |
| | P4 | — | — | — | — | — | — |
| | P5 | — | — | — | — | — | 0.05 |

3 保留场地陂塘系统的不同开发前景模拟

3.1 场地开发前景

前景分析在土地利用规划领域的应用已有较长

的历史,在对面向未来的科学研究和对未来的现实世界的规划中具有十分重要的作用。Yang 等人曾采用前景分析与 SWAT 模拟相结合的方法,研究在不同水土土壤类型上进行高密度或低密度开发对流域产生的水文影响^[4]。也有学者利用 SWMM 模拟城市化前后和加入 LID 设施等不同情景的水文过程,评估城市化对流域水文过程的影响^[5]。

本研究设定开发前、现状和开发后 3 个时段。其中,开发前假设场地除陂塘系统之外全部为林地;现状布局为低密度农村住宅散布在场地之中。根据对两江新区内部 83 个居住区的已有研究^[6],发现两江新区内居住区最大占地面积约为 46.4 hm²,最小占地面积约为 2.45 hm²,平均占地规模约为 8.55 hm²。据此假设开发后要在场地范围内开发建设 10 hm² 的居住区,分为 3 种开发模式:低居住密度(别墅为主)、中居住密度(多层为主)和高居住密度(高层为主)。在相同的开发面积下,建设用地布局在陂塘系统的上游、中游和下游(见图 3)。根据对不同类型居住区内部不透水比例的统计中值^[6],设定 3 种开发模式下的不透水面比例分别为 45%、40% 和 35%。居住区建设所选取的汇水单元的平均坡度均在 25% 以下。开发地块优先占用原有的农宅聚落,其次是草地、旱地和林地,不占用水田和水塘。未被开发的汇水单元,若为农宅聚落用地则转化为林地,若为其他则保留原来的用地类型。

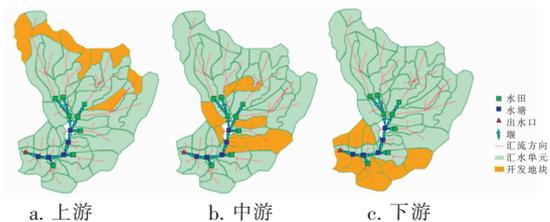


图 3 上游、中游与下游不同开发前景下的地块选择

Fig. 3 Different locations of development areas in upstream, midstream and downstream

3.2 雨洪调蓄

在 2000 年—2012 年逐日降雨数据模拟条件下,对 9 种开发前景的水文模拟结果进行了统计,如表 5 所示。可以看出,高密度上游开发前景下的地表径流深度、出水口的总出流体积最小,地下水回补量最多。随开发布局由上游至下游,系统最大出流量逐渐变大。从径流控制率来看,上游开发前景下的陂塘系统径流控制率均在 67% 以上,因此将建设

用地布局在上游,更能够发挥陂塘系统的雨洪调蓄能力。

表5 2000年—2012年逐日降雨数据下不同情景的水文模拟结果

Tab. 5 Hydrological simulation results of different scenarios under daily rainfall data during 2000 to 2012

| 居住密度 | 布局位置 | 地表径流深度/mm | 地下水回补量/mm | 蒸发量/mm | 系统平均出流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) | 系统最大出流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) | 总出流体积/ 10^6 m^3 | 径流控制率/% |
|------|------|-----------|-----------|--------|--|--|---------------------------|---------|
| 低 | 上游 | 1 607.62 | 11 780.94 | 525.02 | 0.183 | 1.078 | 241.72 | 67.15 |
| | 中游 | 1 678.46 | 11 714.68 | 520.34 | 0.186 | 1.087 | 252.26 | 63.24 |
| | 下游 | 1 667.34 | 11 725.69 | 520.49 | 0.080 | 1.091 | 280.09 | 65.04 |
| 中 | 上游 | 1 587.25 | 11 826.05 | 500.42 | 0.182 | 1.078 | 240.80 | 67.14 |
| | 中游 | 1 647.78 | 11 769.49 | 496.19 | 0.186 | 1.086 | 249.92 | 66.15 |
| | 下游 | 1 638.36 | 11 778.63 | 496.51 | 0.086 | 1.090 | 273.44 | 65.26 |
| 高 | 上游 | 1 567.41 | 11 870.30 | 476.01 | 0.182 | 1.078 | 240.08 | 67.13 |
| | 中游 | 1 618.51 | 11 822.54 | 472.40 | 0.186 | 1.085 | 247.81 | 66.22 |
| | 下游 | 1 610.55 | 11 830.12 | 472.88 | 0.100 | 1.088 | 266.91 | 65.48 |

在不同重现期24 h设计降雨条件下,对9种开发情景进行模拟,对比系统最大出流量,结果与长期降雨条件下的模拟结果一致(见表6)。对比同一居住密度下不同布局位置,发现上游开发情景下场地出水口的峰值流量最小,其次是中游开发,最大的是下游开发。对比同一布局位置下不同开发密度的模拟结果,发现上游开发在3种不同居住密度下的峰值流量无明显差异。在中游和下游位置开发时,高密度开发情景下的场地出水口峰值流量最小,其次是中密度开发情景,峰值流量最大的是低居住密度开发。

表6 不同重现期24 h设计降雨下9种开发情景的峰值流量

Tab. 6 Peak runoff flow of nine scenarios under designed 24-h rainfall with different return periods $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

| 居住密度 | 布局位置 | $P=1$ 年 | $P=5$ 年 | $P=10$ 年 | $P=20$ 年 | $P=50$ 年 | $P=100$ 年 |
|------|------|---------|---------|----------|----------|----------|-----------|
| 低 | 上游 | 1.188 | 1.945 | 2.310 | 2.657 | 3.123 | 3.446 |
| | 中游 | 1.272 | 2.017 | 2.379 | 2.723 | 3.195 | 3.492 |
| | 下游 | 1.345 | 2.204 | 2.584 | 2.946 | 3.383 | 3.493 |
| 中 | 上游 | 1.188 | 1.945 | 2.310 | 2.657 | 3.123 | 3.446 |
| | 中游 | 1.266 | 2.009 | 2.372 | 2.716 | 3.188 | 3.492 |
| | 下游 | 1.329 | 2.171 | 2.554 | 2.917 | 3.359 | 3.493 |
| 高 | 上游 | 1.188 | 1.945 | 2.310 | 2.657 | 3.123 | 3.446 |
| | 中游 | 1.259 | 2.001 | 2.365 | 2.709 | 3.180 | 3.492 |
| | 下游 | 1.313 | 2.140 | 2.523 | 2.887 | 3.332 | 3.493 |

综合来看,在长期降雨条件模拟下,高密度上游开发对场地的水文影响最小。陂塘系统对地表产流总量的控制率约为67%。单场设计降雨条件下的模拟结果也显示,相比中游和下游布局,将建设用地布局在上游时,场地的峰值径流量最小,陂塘系统对地表径流的控制率均较高。

4 结论与建议

4.1 结论

在场地尺度上,利用SWMM模拟了陂塘系统的雨洪调蓄能力,发现由水田和水塘构成的陂塘系统能够抵御百年一遇的24 h设计降雨。2000年—2012年的逐日降雨数据模拟结果显示,在有陂塘系统存在的前提下,开发前场地外部出流量由 $1\ 017.84 \times 10^6 \text{ L}$ 下降至 $228.56 \times 10^6 \text{ L}$,削减了77.54%;开发后,场地外部出流量由 $1\ 190.53 \times 10^6 \text{ L}$ 下降至 $241.58 \times 10^6 \text{ L}$,削减了79.70%。开发前、后陂塘系统对径流的控制率分别为75.96%和77.14%。在百年一遇24 h设计降雨条件下,洪峰时刻由开发前的10:05推迟到10:10,峰值流量由 $13.80 \text{ m}^3/\text{s}$ 降低至 $11.44 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

在保留陂塘系统进行未来城市开发建设的假设前提下,提出了由3种开发模式(高、中、低居住区密度)和3种流域布局位置(上游、中游、下游)组合而成的9种开发情景。模拟不同情景条件下,场地的径流特征及陂塘系统在雨洪调蓄方面的表现。结果表明,高密度上游开发模式对场地水文环境的影响最小。长期降雨数据模拟结果显示,陂塘系统对地表产流总量的控制率约为67%。

4.2 应用建议

陂塘作为传统的绿色基础设施组成要素,其“分散布局、源头滞蓄、就地取材、因地制宜、经济低廉”等诸多特点与当代雨洪管理理念不谋而合,应该得到保护、利用与传承。山地丘陵地区的陂塘系统对场地尺度上的地表径流削减效果显著,城市化过程中应尽可能保留,将其转化为未来城市的“海

绵体”,成为城市生态基础设施中的组成部分。陂塘景观的保护与利用可从流域、城市和场地等多尺度展开。在流域尺度,合理布局陂塘的空间位置并在功能上有所侧重。在流域的上游,构建分散的陂塘系统承接山区来水,就地滞蓄洪水,在满足山区灌溉用水的同时实现源头控制;在中游,陂塘系统要与河道相连接,实现雨洪水的两岸分滞,河道水多则蓄水,河道水少则可放水,为河流提供部分生态环境需水;在流域下游,陂塘系统则可以实现“慢排缓释”,滞留雨水和消解部分污染物,减少对流域下游水环境的冲击。在城市尺度,提出适宜陂塘水面率,与绿化率、水面率、年径流控制率等共同作为城市“海绵度”的评价体系标准和海绵城市建设的考核指标,利用现有的陂塘系统或场地内部新建陂塘系统解决地表径流的削减和污染物控制问题,减少对周边未开发村庄的径流和污染物排放。在保留陂塘系统的基础上,考虑与灰色基础设施的结合,将陂塘景观作为整合乡村与城市水系统的水生态基础设施。在场地尺度,通过调整陂塘的设计参数,如改变塘的深度、堤坝的形式、渠堰的断面和植草沟的形式等,调整设计方案,以符合开发后的雨洪管理目标;对已有的陂塘系统进行生态设计修复与维护管理,加强塘与沟渠的清淤疏导,以确保源头雨洪管理功能的正常发挥。

参考文献:

- [1] 陈强. 人工模拟降雨条件下重庆市黄壤坡耕地降雨侵蚀研究[D]. 重庆:西南大学,2012.
Chen Qiang. Yellow Soil Erosion under Simulated Rainfall in Chongqing[D]. Chongqing: Southwest University, 2012(in Chinese).
- [2] 胡宏祥,马友华. 卡庆斯基制与美国制间土粒分析结果的转换[J]. 安徽农业科学,2004,32(6):1156-1157.
Hu Hongxiang, Ma Youhua. Study on the mutual conversion of soil particle analysis between Kachinsky classification and American of system of soil texture[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2004, 32(6): 1156-1157 (in Chinese).
- [3] 智悦. 山地城市排水系统模型的研究与应用[D]. 重庆:重庆大学,2012.
Zhi Yue. Development and Application of Urban Sewerage System Model in Mountainous City[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012(in Chinese).
- [4] Yang B, Li M H. Assessing planning approaches by watershed streamflow modeling: Case study of The Woodlands, Texas[J]. Landscape and Urban Planning, 2011, 99(1): 9-22.
- [5] 王雯雯,赵智杰,秦华鹏. 基于SWMM的低冲击开发模式水文效应模拟评估[J]. 北京大学学报:自然科学版,2012,48(2):303-309.
Wang Wenwen, Zhao Zhijie, Qin Huapeng. Hydrological effect assessment of low impact development for urbanized area based on SWMM[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48(2): 303-309(in Chinese).
- [6] 王润滋. 山地城市居住区设计对降雨径流的影响及控制途径——以重庆市两江新区为例[D]. 北京:北京大学,2013.
Wang Runzi. The Influence of Residential Design in Mountainous City on Rainfall Runoff and Its Control Approaches—A Case Study in Liang Jiang New Area[D]. Beijing: Peking University, 2013(in Chinese).



作者简介:姜芊孜(1988-),女,山东德州人,博士,讲师,主要从事景观生态规划与设计、城市雨洪管理研究。

E-mail:jiangqianzi@sdjzu.edu.cn

收稿日期:2017-12-05