北京大学学报(自然科学版) 第 54 卷 第 5 期 2018 年 9 月
Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, Vol. 54, No. 5 (Sept. 2018)
doi: 10.13209/j.0479-8023.2018.019

基于HSPF的绿色基础设施水文效应模拟
——以大浪河流域为例

邢英华[1] 程翔[2] 秦华鹏[2] 赵志杰[1,2,†]

1. 北京大学环境科学与工程学院，北京 100871; 2. 北京大学深圳研究生院环境与能源学院，城市人居环境科学与技术重点实验室，深圳 518055; † 通信作者, E-mail: zhaozhijie@pku.edu.cn

摘要 以广东省深圳市大浪河流域为研究对象，利用 HSPF 模型模拟研究区不同绿色基础设施设定情景对降雨径流的水文效应。结果表明，按照功效最大化、经济型、适中型原则设定的 3 种情景，产流率分别比背景情景低 34.9%，14.2%和28.5%；最大峰值分别比背景情景低 40.5%，19.8%和33.0%；基流分别比背景情景高 88.9%，11.1%和 44.4%。经济型情景的水文效果不佳，适中型情景的水文效果处于功效最大化情景与经济型情景之间。

关键词 绿色基础设施；降雨径流模拟; HSPF；大浪河流域

中图分类号 X830

Hydrology Effect Evaluation of Green Infrastructure Based on HSPF: A Case Study on Dalang River Basin

XING Yinghua[1], CHENG Xiang[2], QIN Huapeng[2], ZHAO Zhijie[1,2,†]

1. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871; 2. Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Environment and Energy, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055; † Corresponding author, E-mail: zhaozhijie@pku.edu.cn

Abstract Taking Dalang River Basin, Shenzhen city of Guangdong Province as an example, HSPF model was used to simulate hydrological effects of rainfall runoff under different scenarios. The results showed that runoff rate of the efficacy maximization, economical and moderate scenario were decreased by 34.9%, 14.2% and 28.5% than that in background scenario. The peak value of these three scenarios were lower 40.5%, 19.8% and 33.0% than that in background scenario. Base flow of these three scenarios were higher 88.9%, 11.1% and 44.4% than that in background scenario. The economical scenario didn’t reach good effect. The effect of moderate scenario was better than economical scenario and inferior to efficacy maximization scenario.

Key words green infrastructure; rainfall runoff simulation; HSPF; Dalang River Basin

中国城市化进程不断加快，2016 年城市化率已达 57.35%[1]。随着城市扩张，不透水面积大幅度增加[2]，雨水难以下渗，地表径流增加，对河道的改造(如裁弯取直等)也加快了汇流过程[3]，造成城市洪涝灾害。在城市发展过程中，工业和生活污染物猛增，随径流进入城市水体，加剧了城市水环境污染[4]。

构建绿色基础设施(green infrastructure，GI)是一种新的城市化发展理念，可应用于城市雨洪控制等领域。通过不同层次的绿色基础设施，可以削减城市径流，减少污染物的排放，有效地解决上述问题，有利于环境、生态、景观等方面的改善[5]。美

国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07501005)资助
收稿日期: 2017–06–08；修回日期: 2018–01–24；网络出版日期: 2018–06–08

国规划协会对绿色基础设施的定义为: 一种由诸如林荫街道、湿地、公园、林地、自然植被区等开放空间和自然区域组成的相互联系的网络, 能够以自然的方式削减城市雨水径流, 减少城市洪涝灾害, 控制径流污染, 保护水环境[6]。作为低影响开发(low impact development, LID)的主要措施, GI 在海绵城市建设中发挥的作用受到广泛重视[7], 典型措施包括雨水花园、绿色屋顶、植被草沟和雨水塘等。

定量地评估绿色基础设施的水文效应, 有利于客观认识其在雨洪管理中的作用, 对指导 GI 合理布局有重大意义[8]。目前水文模型数量较多, HSPF 模型(Hydrological Simulation Program-Fortran)是半分布式综合模型的优秀代表, 不仅能模拟流域内长时间连续的水文和水力过程, 也能模拟流域非点源污染和点源污染的演进过程[9], 因此得到广泛的应用。Tzoraki 等[10]将岩溶泉流量模型和 HSPF 模型结合, 模拟喀斯特地区地表和地下水的径流水文效应, 模拟结果较好。Cryer 等[11]用 HSPF 模型结合 ArcGIS, 分析美国加利福尼亚州圣华金河　沿岸的农业地区非点源污染现状, 并提出相应的优化方案。石赟赟等[12]模拟东江流域不同下垫面的径流变化情况, 定量地评估土地利用变化对径流的影响。本文以快速城市化的大浪河流域为研究对象, 采用 HSPF 模型模拟流域降雨径流, 比较不同 GI 布局情景的水文效果。

1　研究区概况和模型建立

1.1　流域概况

大浪河位于深圳市龙华区大浪街道, 是龙华河的一级支流, 观澜河的二级支流。河道全长 9.10 km, 天然平均坡降为 5.30‰, 总集雨面积为 11.75 km^2。流域地势北高南低, 为低山丘陵地形, 地势平缓, 地面高程为 50~77 m。流域内平均气温为 21.7℃, 多年平均湿度为 79%, 多年平均蒸发量为 1350 mm。经过 30 多年的城市化, 大浪河流域范围内大量透水天然地面已变为不透水的人工构筑物或路面, 河道也多截弯取直并渠道化, 两岸从自然土质河岸变为混凝土护岸, 洪峰峰值增大、基流严重不足以及水质恶化等问题亟待解决。

1.2　数据来源和概化

大浪河流域的地理数据(地形、河网水系等)从深圳市 1:1000 数字化地形图获得, 土地利用和覆盖资料根据 2014 年遥感影像目视解译获取(图 1)。

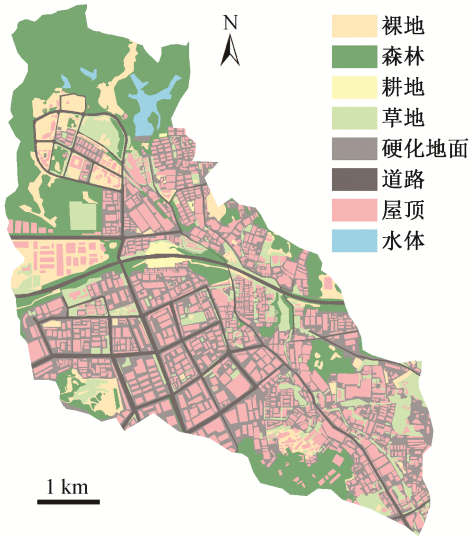

图 1　大浪河流域土地利用分布
Fig. 1　Land use of Dalang River Basin

气象资料来自深圳市气象局在大浪河街道内设立的观测点[13], 包括 2014 年 3 月至 2015 年 3 月的气温、降雨量和蒸发量。监测断面位于大浪河下游, 接近与龙华河的汇入点, 用 FL16 水流记录仪自动监测流量, 得到实际监测数据。根据地形高程、河网水系、土地利用现状和规划及道路信息等, 将大浪河流域概化分为 64 个汇水单元(图 2)。

1.3　模型参数率定

根据 HSPF 模型手册[14]、HSPFParm[15]以及文献[16]设定水文部分主要参数的取值范围(表1)。

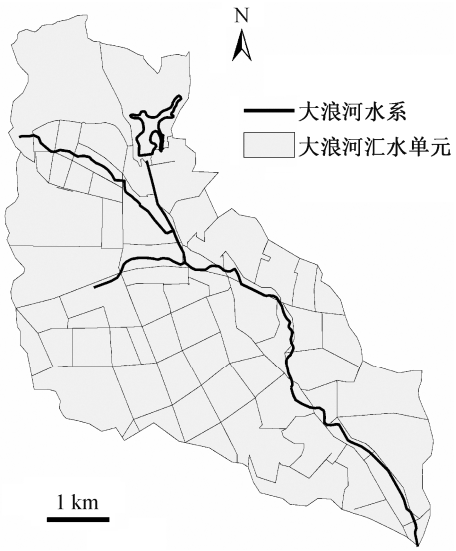

图 2　大浪河流域汇水单元
Fig. 2　Catchment units of Dalang River Basin

表 1　模型水文部分主要参数取值

Table 1　Main parameters of hydrological part

参数	单位	说明	参数调整范围	取值
LZSN	in	额定的下土壤层蓄积	2.0~7.8	5.0~6.5
UZSN	in	额定的上土壤层蓄积	0.902~1.354	1.128
INFILT	in/h	土壤渗透率	0.13~0.19	0.4~0.6
AGWRC	d^{-1}	地下水日退水系数	0.190~0.999	0.98
DEEPER		地下水入流比例	0.08~0.12	0.10
INTFW		壤中流入流系数	0.1~7.5	0.75
IRC	d^{-1}	壤中流退水系数	0.30~0.85	0.5

以监测断面实测值作为模型率定验证的对比资料，根据表 1 给定的范围调整参数。选用相对误差(RE)和 Nash-Sutcliffe 标准(NASH 系数)来评估模拟效果。NASH 系数用于描述计算值对目标值的拟合精度，一般取值在–∞~1 之间，NASH 系数在 0.8 以上表示符合要求，为甲等；0.6~0.8 表示基本上符合要求，为乙等；低于 0.6 则表示偏差过大，为丙等，结果不理想[17]。NASH 公式计算如下：

$$E = 1 - \sum_{i=1}^{n}\left(Q_i - Q_i'\right)^2 \Big/ \sum_{i=1}^{n}(Q_i - \bar{Q})^2 , \qquad (1)$$

Q_i 为 i 时刻的观测流量(m^3/s); Q'_i 为 i 时刻的模拟流量(m^3/s); n 为时段总数; $\bar{Q}$ 为平均观测流量。

日径流模拟结果见图 3。模拟值与实测值走势相同，相关系数为 0.993, NASH 系数为 0.949，达到甲等。

小时径流模拟结果见图 4。模拟值与实测值峰值的走势基本上一致，相关系数为 0.958，NASH 系数为 0.899，达到甲等。以上结果表明，模拟结果能较好地反映流域径流的变化趋势。

1.4　模型验证

选取大浪河流域 2015 年 2 和 3 月的径流量实测值来验证模型。2015 年 2 月的模拟流量为 12.6×10^4 m^3，实测流量为 11.3×10^4 m^3，相对误差为 11.6%；2015 年 3 月模拟流量为 9.4×10^4 m^3，实测流量为 8.7×10^4 m^3，相对误差为 8.7%。结果显示偏差均在 15%以下，模拟精度满足本研究的要求。

验证 2015 年 2—3 月的日径流，结果如图 5 所示。模拟值与实测值走势基本上相同，相关系数为 0.991, Nash-Sutcliffe 系数为 0.777，达到乙等，基本上满足模拟与率定的要求。以上结果表明，模型通过验证，可用于大浪河流域径流过程的模拟。

2　不同 GI 情景和效果模拟

2.1　GI 适建区域

选择典型的绿色基础设施，根据其适用性，选定大浪河流域各绿色基础措施的适建区域，为不同

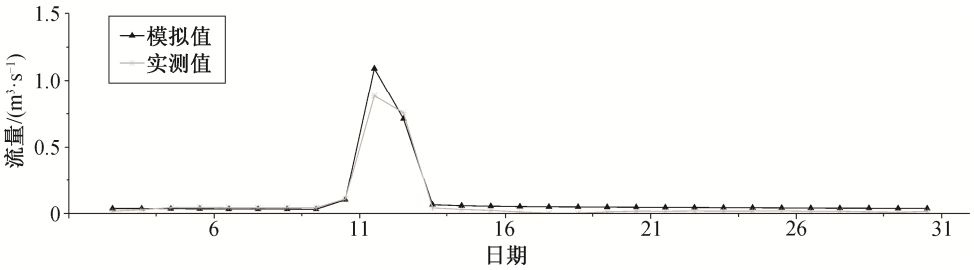

图 3　大浪河流域日径流模拟效果率定 (2015 年 1 月)

Fig. 3　Calibration of daily runoff simulation of Dalang River Basin (Jan., 2015)

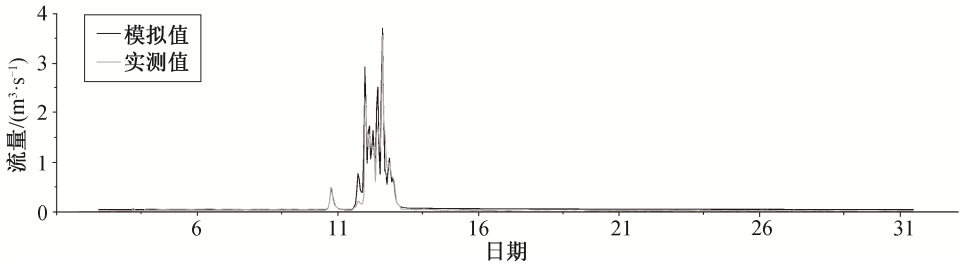

图 4　大浪河流域小时径流模拟效果率定(2015 年 1 月)

Fig. 4　Calibration of daily runoff simulation of Dalang River Basin (Jan., 2015)

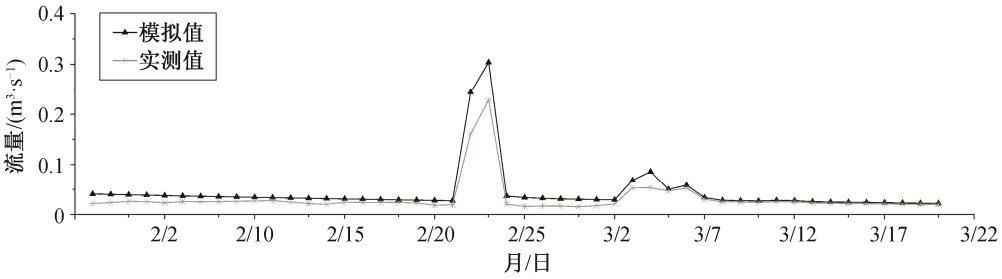

图 5　大浪河流域日径流模拟效果验证 (2015 年)

Fig. 5　Verification of daily runoff simulation of Dalang River Basin (2015)

情景的布局提供参考。

1) 绿色屋顶。建议在排水坡度为 2%~5%的平屋顶上使用[18]，降水不会过快地排走，延缓径流峰值出现。此坡度的绿色屋顶不需要额外增加防滑措施，成本较小。

2) 植被草沟。不适宜在不透水地表过多的高密度区域或路网复杂的区域，也不宜布置在径流污染严重的地方，以免污染物影响地下水。适宜建设在地表径流污染程度相对较轻、汇水区域较小、绿化覆盖度较大的公园、住区和学校等地[19]。干式植被草沟适用于土壤渗透性较好的区域及排水面积较小的区域；湿式植被草沟一般用于高速公路的排水系统，也用于过滤来自小型停车场或屋顶的雨水径流，不适用于居住区。

3) 雨水花园。应设置在地势较低且土壤渗透性良好的地方，且边线距离一般建筑基础至少为 3 m，确保浸水不会损坏建筑基础。

4) 透水铺装。不适用于交通负荷和污染负荷太高的区域。对于水泥混凝土路面，可在交通负荷不高的区域设置；对于交通道路，支路与次干路承受交通压力较小，可作为透水铺装应用的主要场合[20]。

5) 生物滞留系统。占地面积小，可广泛用于道路、停车场和商业区等不透水系数较高的区域，与道路之间的缓冲距离小于 30 m，与建筑之间的缓冲距离大于 3 m。

根据流域的土地利用现状以及龙华区的相关规划，确定大浪河流域各项绿色基础设施的适建区域(图 6)。

2.2　情景设定

2.2.1　背景情景

以现状为基准，保持土地利用类型不变，不添加任何绿色基础设施，保持模型参数不变，作为背景情景与其他情景对照。

2.2.2　规划情景

在考虑各类 GI 设施适建条件的基础上，主要从设施水文效应和经济成本两方面考虑，提出以下 3 种规划情景，包括 GI 设施的类型、数量和布局。

1) 情景 1：功效最大化。以最大限度控制降雨径流为首要目标，不考虑经济成本，充分利用一切可行的绿色基础设施，最大化地减少城市开发对自然环境、降雨径流造成的影响。

2) 情景 2：经济型。以绿色基础设施建设时的经济、简便、易操作为主要目标，对适建区的绿色基础设施结构进行一定的调整，避免经济负担过大。

3) 情景 3：适中型。综合考虑 GI 的功效和经济成本，既考虑对流域降雨径流控制有较好结果，又追求经济效益。

3 种方案的规划示意图见图 7，绿色基础设施布局以及造价见表 2。

2.3　模拟结果

2.3.1　背景情景模拟结果

大浪河流域在研究时段内的径流总量为 1.28×10^7 m^3，径流的产流率为 58.5%；产生的最大径流峰值为 114.0 m^3/s，流域全年基流为 0.45 m^3/s。

2.3.2　规划情景模拟结果

1) 功效最大化情景。按照功效最大化原则，在大浪河流域设定 GI，来模拟水文效果。模拟结果显示，在流域 GI 适建区域全部设定对应的 GI 后，在研究时段内产生的径流总量为 8.30×10^6 m^3，产流率为 38.1%；产生的最大峰值为 67.8 m^3/s；流域全年基流为 0.85 m^3/s。

2) 经济型情景。按照经济型原则，在大浪河流域调整 GI 的布局位置、数量及各项 GI 的水文效果。模拟结果表明，在研究时段内的径流总量为

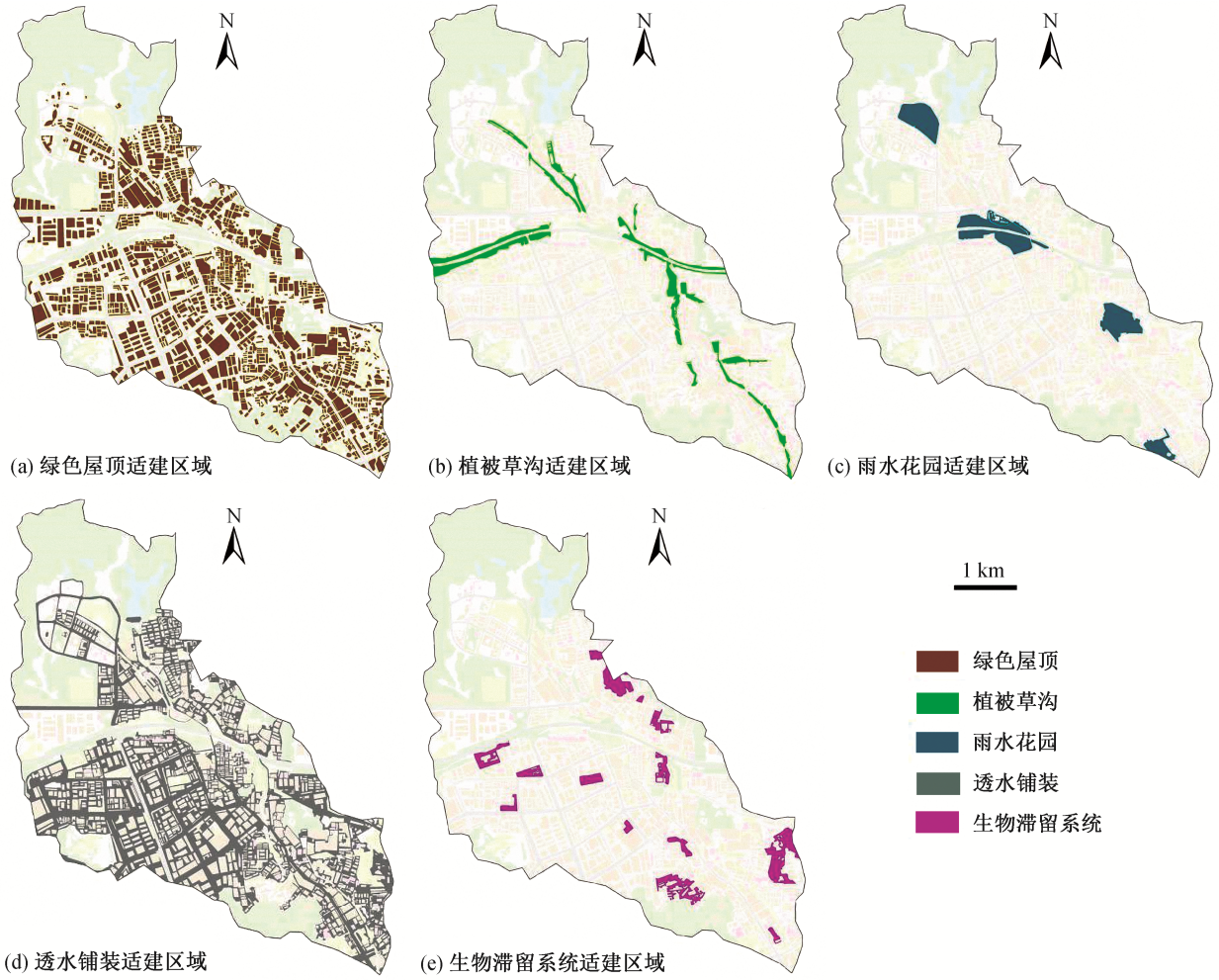

图 6　大浪河流域绿色基础设施的适建区域

Fig. 6　Applicable regions in Dalang River Basin

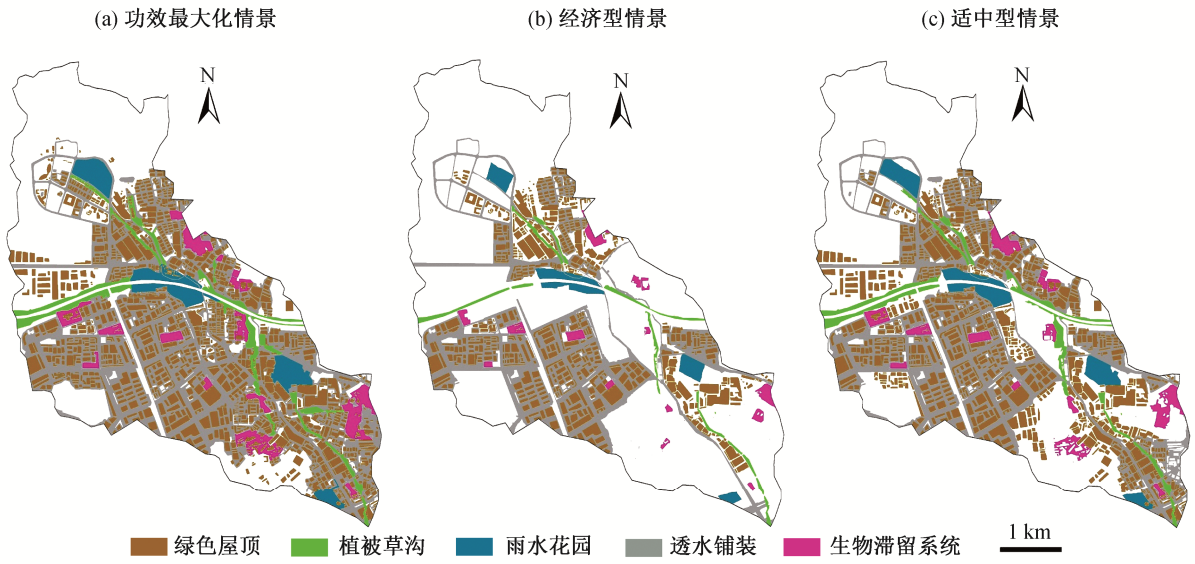

图 7　大浪河流域功效最大化情景(a)、经济型情景(b)和适中型情景(c)规划图

Fig. 7　Plannings of efficacy maximization scenario (a), economical scenario (b) and moderate scenario (c) of Dalang River Basin

表 2 大浪河流域绿色基础设施布局及造价

Table 2 Layout and construction cost of green infrastructures in Dalang River Basin

绿色基础设施	情景 1	造价/(元·m^{-2})	情景 2	造价/(元·m^{-2})	情景 3	造价/(元·m^{-2})
绿色屋顶	种植土层深度大于1.5 m的绿色屋顶，按适建区域面积的100%代替绿化面积	500	建造种植土层深度大于0.4 m、小于1.0 m 的绿色屋顶，按适建区域面积的20%代替绿化面积	200	建造种植土层深度大于1.0 m、小于1.5 m的绿色屋顶，按适建区域面积的 60%代替绿化面积	300
植被草沟	面积为其所在单元汇水面积的15%，纵坡坡度为 3%	160	在适建区域使用湿式植被草沟，面积为其所在单元汇水面积的 5%，纵坡坡度为 1%	80	在适建区域使用湿式植被草沟，面积为其所在单元汇水面积的 10%，纵坡坡度为 2%	100
雨水花园	主要布置在地势较低且土壤渗透性良好的区域，面积为其所在单元不透水面积的 25%	400	面积控制在其所在单元不透水面积的 10%	200	面积控制在其所在单元不透水面积的 20%	250
透水铺装	在适建区域内将所有铺装全部改装为透水铺装	180	在适建区域内将所有铺装全部改装为透水铺装，对面层及蓄水层材料进行一定替换	100	在适建区域内将所有铺装全部改装为透水铺装，使用中档透水铺装的面层及蓄水层材料	120
生物滞留系统	适建区域主要在城市开发区域内一定数量的草地上，面积为其所在单元的 10%	300	面积控制在其所在单元的 5%	180	面积控制在其所在单元的 8%	220

1.09×10^7 m^3，产流率为 50.2%；产生的最大峰值为 91.4 m^3/s；流域全年基流为0.50 m^3/s。

3) 适中型情景。按照综合考虑水文效应和成本的适中型原则，在大浪河流域调整 GI 的布局位置、数量及各项 GI 的水文效果。模拟结果显示，在研究时段内的径流总量为 9.11×10^6 m^3，产流率为 41.8%；产生的最大峰值为 76.4 m^3/s；流域全年基流为 0.65 m^3/s，。

2.4 综合对比分析

用 HSPF 模型模拟 4 种不同情景，得到不同情景的水文效果与造价(表 3)。功效最大化情景的径流总量远低于背景情景，产流率比背景情景低 34.9%；最大峰值比背景情景低 40.5%，基流比背景情景高 88.9%。经济型情景的径流总量比背景情景低，产流率比背景情景低 14.2%；最大峰值比背景情景低 19.8%，基流比背景情景高 11.1%。适中型情景的径流总量低于背景情景，产流率比背景情景低 28.5%；最大峰值比背景情景减少 33.0%，基流比背景情景高 44.4%。

表 3 各项情景水文效果与造价比较

Table 3 Comparison of hydrological effect and construction cost of all the scenarios

情景	水文				造价/亿元
	径流总量/10^6 m^3	产流率/%	最大峰值/(m^3·s^{-1})	基流/(m^3·s^{-1})	
背景情景	12.8	58.5	114.0	0.45	—
情景 1	8.3	38.1	67.8	0.85	23.5
情景 2	10.9	50.2	91.4	0.50	10.7
情景 3	9.1	41.8	76.4	0.65	14.7

3 结果与讨论

本文利用实地水文监测资料和土地利用情况，建立大浪河流域 HSPF 水文模拟模型。该模型可以较好地模拟流域降雨径流过程以及绿色基础设施的水文效果。按照功效最大、经济成本低、实用可行的原则，规划设计了大浪河流域的 3 种绿色基础设施建设情景方案，利用 HSPF 模型对各情景方案的水文效果进行模拟分析和比较，得到以下结论。

1) 在功效最大化情景下，径流总量、产流率和最大峰值比背景情景有显著降低，产流率、最大峰值分别比背景情景低 34.9%和 40.5%，基流比背景情景高 88.9%，说明在适建区域内最大限度地建设绿色基础设施可以达到非常好的水文效果，也意味着需要承担高额的成本。

2) 经济型情景下，各项水文效果均排名最后，产流率和最大峰值比背景情景低 14.2%和 19.8%，基流比背景情景高 11.1%，总体效果不佳，说明以成本为首要考量的绿色基础设施难以达到理想的设计效果。

3) 综合考虑经济成本和水文效果的适中型情景的水文效果介于功效最大化与经济型情景之间，产流率和最大峰值比背景情景低 28.5%和 33.0%，

基流比背景情景高 44.4%，说明在绿色基础设施的选取布局与成本之间需要寻求平衡，以便在负担合理成本的情况下达到较理想的实施效果。

在 HSPF 模型对水文过程的模拟结果中，2015 年 2 和 3 月的相对误差分别为 11.6%和 8.7%，月模拟值与实测值的相对误差均在 15%以下，日模拟值与实测值的走势基本上一致，相关系数为 0.991，Nash-Sutcliffe 系数为 0.777，表明模型能够较好地模拟该流域的水文情况。本研究构建模型时，能够使用的背景及监测数据较少，若增设监测断面，则可以得到更细致的时间、空间尺度的数据。将来可在已建立的模型基础上，进一步提高精度，更精确地模拟大浪河流域的水文情况。同时建议在重点流域建立更完善、更系统的水文水质监测设施，以便更全面地掌握流域情况，并留存翔实的监测数据，为相关工作提供坚实的基础。

在城市规划和建设中，需要考虑的因素复杂多样，其中建造成本是一个非常重要的制约项。在利用 HSPF 模型模拟水文效果的同时，考虑绿色基础设施的成本造价，计算不同模拟规划情景的成本，对城市化地区实施绿色基础设施建设具有一定的实际参考意义。后续研究中可综合比较大量不同组合水平的绿色基础设施水文效应及成本，选出费用–效益最优的方案来付诸实施。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国 2016 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. [2017–02–28] (2017–05–08). http://www.stats.gov.cn/tjsj./zxfb/201702/t20170228_1467424.html

[2] 袁艺，史培军，刘颖慧，等. 土地利用变化对城市洪涝灾害的影响. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 6–13

[3] 宋全香，左其亭，杨峰. 城市化建设带来的水问题及解决措施. 水资源与水工程学报，2004，15(1): 56–58

[4] 张伟，车伍，王建龙，等. 利用绿色基础设施控制城市雨水径流. 中国给水排水, 2011, 27(4): 22–27

[5] 张伟. 绿色基础设施：雨洪控制利用新途径. 中国建设报, 2010–07–16 (007)

[6] Wise S. Green infrastructure rising. Planning, 2008, 74(8): 14–19

[7] Cahill T H. Low impact development and sustainable stormwater management. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012

[8] 刘颂，毛家怡，沈洁. 基于 SWMM 的场地绿色雨水基础设施水文效应评估——以同济大学校园为例. 风景园林, 2017(1): 60–65

[9] 李兆富，刘红玉，李燕. HSPF 水文水质模型应用研究综述. 环境科学, 2012, 33(7): 2217–2223

[10] Tzoraki O, Nikolaidis N P. A generalized framework for modeling the hydrologic and biogeochemical response of a Mediterranean temporary river basin. Journal of Hydrology, 2007, 346(3/4): 112–121

[11] Cryer S A, Fouch M A, Peacock A L, et al. Characterizing agrochemical patterns and effective BMPs for surface waters using mechanistic modeling and GIS. Environmental Modeling & Assessment, 2001, 6(3): 195–208

[12] 石赟赟，董延军，李杰，等. 东江流域土地覆被变化的水文响应模拟研究. 人民珠江, 2009, 30(6): 27–30

[13] 深圳市气象局(台). 区域气象观测站观测实况(2014–2015)[EB/OL]. (2015) [2017–06–01]. http://www.szmb.gov.cn

[14] Becknell B R, Imhoff J C, Kittle Jr J L, et al. Hydrological simulation program—FORTRAN user's manual for release 12. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 2001

[15] Donigian Jr A S, Imhoff J C, Kittle Jr J L. HSPFParm: an interactive database of HSPF model parameters Version 1.0. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 1999

[16] 董延军，李杰，郑江丽，等. 流域水文水质模拟软件(HSPF)应用指南. 郑州：黄河水利出版社, 2009

[17] 程翔，赵志杰，秦华鹏，等. 漠阳江流域水环境容量的时空分布特征研究. 北京大学学报(自然科学版), 2016, 52(3): 505–514

[18] GB50207–2012. 屋面工程质量验收规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社, 2012

[19] 赵芳. 绿色建筑与小区低影响开发雨水利用技术研究[D]. 重庆：重庆大学, 2012

[20] Baladès J D, Legret M, Madiec H. Permeable pavements: pollution management tools. Water Science & Technology, 1995, 32(1): 49–56