

DOI: 10.5846/stxb201812052667

郇宇琦,王春连.基于燕尾洲生态护堤模式的金华江流域防洪效应研究.生态学报,2019,39(16): - .

Li Y Q, Wang C L. Yanweizhou ecological embankment strategy and its effects on flood control in the Jinhua River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): - .

基于燕尾洲生态护堤模式的金华江流域防洪效应研究

郇宇琦^{1,3}, 王春连^{2,4,*}

1 北京大学建筑与景观设计学院, 北京 100871

2 北京大学景观设计学研究院, 北京 100871

3 华盛顿大学城市设计与规划学院, 西雅图 98105

4 北京土人城市规划设计股份有限公司, 北京 100080

摘要: 气候变化背景下,洪水灾害发生频率增加,在全球范围内造成了破坏性影响。以金华江流域为研究区,以燕尾洲公园生态护堤设计模式为典型,探究不同生态护堤模式替代水泥堤防产生的流域防洪效应。研究利用 SWAT 模型,模拟不同设计形式和面积比例的生态护堤,在金华江流域洪水过程的流量调控、洪峰削减与水位调节 3 个方面所产生的效应。研究发现,随着流域范围内更多的水泥堤防被生态护堤所取代,洪水过程线变得更为平缓,年最大一日洪峰削减率最高可达 63%,燕尾洲公园生态护堤模式较水泥堤防有良好的洪水削减作用。燕尾洲公园水位调控效果表明,公园生态护堤能够成功抵御模拟年份内所有场次洪水,且能够有效避免河道的硬化和白化,具有较强的推广应用价值。

关键词: 生态护堤设计; SWAT 模型; 洪峰削减; 退水过程; 水位调节; 燕尾洲公园

Yanweizhou ecological embankment strategy and its effects on flood control in the Jinhua River Basin

LI Yuqi^{1,2}, WANG Chunlian^{3,4,*}

1 College of Architecture and Landscape Architecture, Peking University, Beijing 100871, China

2 Department of Urban Design and Planning, University of Washington, Seattle 98105, USA

3 The Graduate School of Landscape Architecture, Peking University, Beijing 100871, China

4 Beijing Turen Urban Planning and Design Company Limited, Beijing 100080, China

Abstract: Rapid urbanization has increased the frequency of flood disasters, causing devastating effects globally. This study selected the Jinhua River Basin as the study area and used the ecological embankment strategies of Yanweizhou Park as a typical model to explore the flood control effects of different ecological embankments. The SWAT (Soil & Water Assessment Tool) model was used to simulate flow regulation, peak flow reduction, and peak stage adjustment in the Jinhua River Basin under 129 embankment scenarios with different design forms and area ratios. The study found that as more concrete embankments were replaced by ecological embankments, the flow during the flow hydrography was smoother, with a maximum annual peak flow reduction rate of 63%. Yanweizhou ecological embankment strategies have better peak flow reduction effects than the concrete embankments. The Yanweizhou ecological embankment strategies can successfully resisted all floods during the simulation year, and can effectively prevent the hardening and bleaching of the river, and thus have a strong application value.

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401105);国家自然科学基金面上项目(51678002)

收稿日期:2018-12-05; 网络出版日期:2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 402208932@qq.com

Key Words: ecological embankment; SWAT model; peak flow reduction; recession process; peak stage adjustment; Yanweizhou Park

近一个世纪,全球气候持续变暖。在全球变暖背景下,极端天气事件频发^[1],引发了地震、泥石流、旱灾、洪灾等自然灾害,造成巨大的经济损失^[2-3]。在由不同自然灾害造成的全球经济损失中,洪灾成为困扰人类的首要自然灾害^[4-6]。

人类防治洪水灾害可采取水利工程和生态护堤两种措施。水利工程措施如修筑、加固堤防通常被视作抵御洪水的最终方案,然而,这些防御措施不仅建设成本高、维护费用昂贵^[7-8],并且降低河岸对洪水的自适性能力,使其丧失本应具备的天然防洪能力^[9-12]。生态护堤能够弥补水利工程产生的诸多生态、环境问题,是一种更可持续的防洪战略。近期在欧洲的实践表明,与传统堤防的防洪效果相比,采取生态护堤具有更高的可持续性与成本效益,并具有额外的优势和较少的副作用^[9]。又如纽约市构建的沿海绿色基础设施—有生命的防洪堤,能够在保护或拓宽海滩的同时削弱风浪,降低沿海风暴潮风险,并减少建筑物和基础设施的破坏^[13]。

生态护堤依据生态工法思路,采用天然材料、人工材料或混合材料构筑沿河护堤,既能发挥自然堤岸的生态系统作用,又能抵御洪水灾害、防止堤岸侵蚀^[10, 14-15]。生态护堤依据河道断面形式及承接河流类型的不同,可分为立式、斜式和阶式^[16-17];或可依据护堤材质的差异,分为自然原式,自然式与人工自然式^[18]。在生态护堤防洪效应方面,国内外研究多以定性描述其防洪功能为主,仅少数学者对生态护堤相较水泥堤防的防洪效果进行对比研究。在定量对比研究中,Acreman 等对现状河道、经恢复河道和渠化河道三种情景进行洪峰削减量的计算,得出相较现状河道,洪峰在经恢复河道内削减了 10%,而洪峰在渠化河道内增加了 50%—150%^[19]。刘静研究了河道糙率对河道水位、流速的影响,并分别建立水位、流速与河道糙率的拟合公式。结果表明,河道内植被越密集,糙率越大,植被对流水的阻力越大,水流流速越低、水位越高^[20]。定性对比研究方面,仅 Temmerman 等对沿海传统工程堤防和生态护堤分别进行了优劣分析与案例综述,提出沿海建设生态护堤的可行性与潜在价值^[9]。综上,国内外研究多以定性探讨生态护堤类型、防洪效果为主^[14, 16, 18, 21],较少定量对比研究不同生态护堤相较水利工程措施的洪水削减能力。

在生态护堤的防洪设计实践方面,位于金华市金华江流域出口的燕尾洲公园打破了公园传统设计手法,提出以可淹没的梯田式生态护堤替代传统水泥防洪堤方案。这一方案不仅能有效缓解防洪压力,更使得公园成为兼具防洪功能与休憩娱乐的美丽景观^[22]。

为探究不同设计模式生态护堤的防洪效应,研究以燕尾洲公园生态护堤设计手法为依据,选择以燕尾洲公园所属金华江流域为研究区,通过单独或同时改变护堤植被覆盖、坡度和改造护堤所占面积比例三个护堤设计参数,设计流域尺度不同生态护堤模式。利用 SWAT 流域水文模型,模拟研究流域不同生态护堤模式的流量调控、洪峰削减与水位调节效应。研究深入揭示了护堤模式变化下的洪水响应机制,为流域尺度推广燕尾洲护堤模式提供理论依据。同时,在全国探索建设海绵城市、推进河长制背景下,研究河流生态护堤取代水泥堤防有重要的实践意义。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究以燕尾洲公园所在流域——金华江流域为研究区(图 1)。金华江流域位于浙江省最大的金衢盆地东部,流域地势南北高,中间低,属于亚热带季风气候,四季分明,雨热同季,光温互补^[23]。流域降水受地形影响,空间分布不均,年平均降水量 1458 mm,年降水量变化范围 1300—2000 mm^[24]。流域 4—6 月和 7—9 月分别受梅雨和台风控制,全年存在两个雨季^[25]。流域汛期为 5—9 月,汛期降水量可达年降水量的 55%^[26]。

燕尾洲公园位于金华市多湖片区东市街以西,三江国际花园以北,义乌江和武义江汇合处,面积约 75 万 m²。公园将场地原有的硬质驳岸改造为具有不同安全级别的可淹没的防汛堤,采用梯田形式,并在台地上种

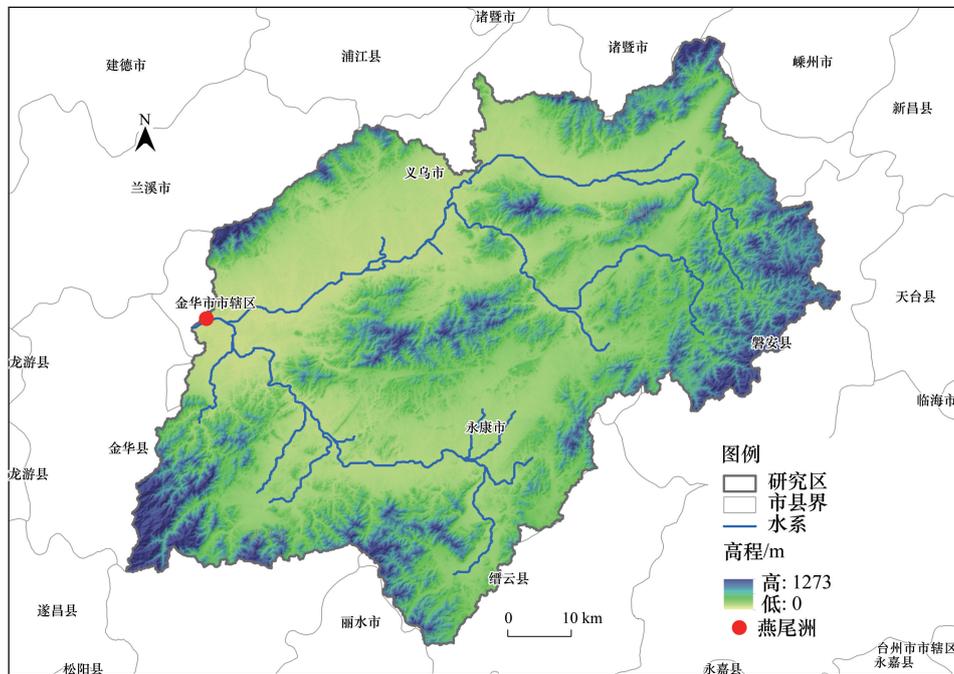


图1 研究区位置图

Fig.1 The study site

植乡土植物,从而实现洪水削减于生态多样性的恢复^[22]。

1.2 SWAT 模型与数据预处理

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是由美国农业部(USDA)开发的新一代分布式流域水文模型。SWAT 模型待输入数据包括 DEM、土壤类型图、土地利用类型图、气象数据(降水、气温数据等)、水库出流数据(月尺度)等。本研究通过实地调研、文献获取和相关部门数据库查询等获取数据资料,后用 Matlab、ArcGIS 等软件进行预处理,编入数据库。预处理后数据如图 2。

1.3 模型校正与验证

SWAT 模型在初次运行完毕后,需要对模型进行校正与验证。本文在 SWAT—CUP 模型中,利用拉丁超立方体抽样和多元回归方法进行 SWAT 模型参数敏感性分析,并利用金华站和对家地站的实测月流量数据,对模型进行参数率定与模型校准。选取纳什系数 NS(Nash-Sutcliffe efficiency)和偏差百分比(PBIAS)两个指标来评价模型的适用性,相关研究认为 $NS > 0.5$ 、 $|PBIAS| < 25\%$ 时模拟结果良好^[27-28]。模型校正期与验证期结果见表 1 和图 3。

表 1 模型校正期与验证期评价结果对比

Table 1 Comparison of evaluation results between model calibration period and validation period

流量站 Hydrological station	模型校正期(2007—2010 年) Model calibration period		模型验证期(2011—2015 年) Model validation period	
	纳什系数 NS	偏差百分比 PBIAS	纳什系数 NS	偏差百分比 PBIAS
	金华站	0.89	-13.9	0.79
对家地站	0.82	-0.6	0.75	4.3

由表 1 和图 3 可知,模型校正期、验证期 NS 系数均大于 0.65, PBIAS 绝对值均小于 25%(表 1),模型验证期模拟值与实测值吻合度高(图 3),模型模拟效果很好,可被用于情景模拟。

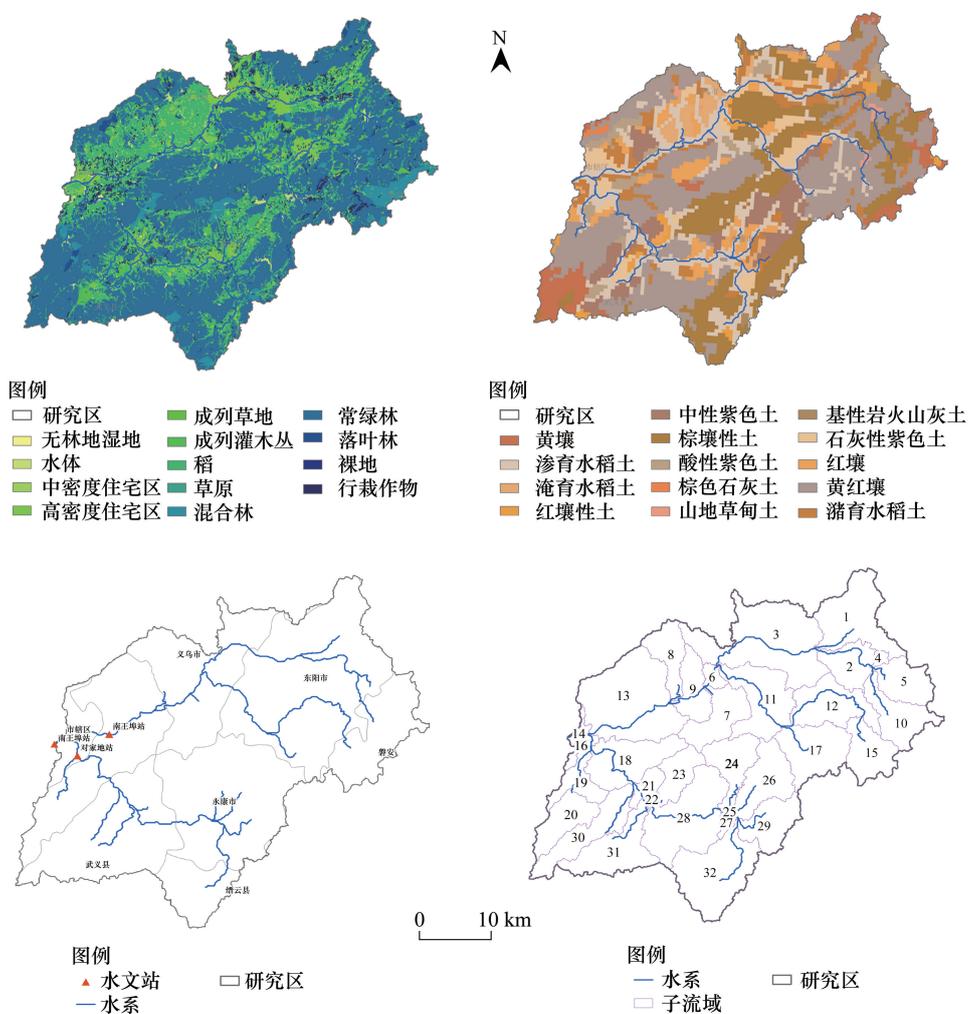


图2 SWAT模型预处理后数据: (A) 研究区土地利用类型图; (B) 研究区土壤分布图; (C) 研究区水文站分布图; (D) 研究区子流域划分图

Fig.2 Preprocessed data in SWAT model: (A) land use map; (B) soil map; (C) hydrographic station distribution map; (D) sub-watershed division map

WETN: 无林地湿地 Wetlands nonforested; WATR: 水体 Water; URMD: 中密度住宅区 Residential medium density; URHD: 高密度住宅区 Residential high density; RNGE: 成列草地 Range grasses; RNGB: 成列灌木丛 Range brush; RICE: 稻 Rice; PAST: 草原 Pasture; FRST: 混合林 Forest mixed; FRSE: 常绿林 Forest evergreen; FRSD: 落叶林 Forest deciduous; BARR: 裸地 Barren land; AGRR: 行栽作物 Agricultural land row crops; ADRIAN: 黄壤 Adrian; AMENIA: 渗育水稻土 Amenia; BENSON: 淹育水稻土 Benson; BERKSHIRE: 红壤性土 Berkshire; BLASDELL: 中性紫色土 Blasdel; CASTILE: 棕壤性土 Castile; FARMINGTON: 酸性紫色土 Farmington; HOOSIC: 棕色石灰土 Hoosic; KARS: 山地草甸土 Kars; SAPRISTS: 基性岩火山灰土 Saprist; TACONIC: 石灰性紫色土 Taconic; TISBURY: 红壤 Tisbury; WAITSFIELD: 黄红壤 Waitsfield; WEIDER: 潴育水稻土 Weider

2 生态护堤模式设计及模型模拟

2.1 燕尾洲公园生态护堤设计模式

燕尾洲公园位于东阳江和武义江的交汇之处,占地面积约为 75 万 m^2 。生态护堤将原有水泥堤防拆除,替以梯田式生态护堤,减缓护堤坡度的同时,于梯田台地上种植乡土植物(池杉、水杉、吉祥草等),将护堤改造为可被洪水淹没的梯田种植带,实现与洪水为友的弹性防洪。这一生态护堤模式不但能够增加行洪断面、缓解对岸城市一侧的防洪压力,同时满足了人们的日常休闲活动和对景观美的需求。

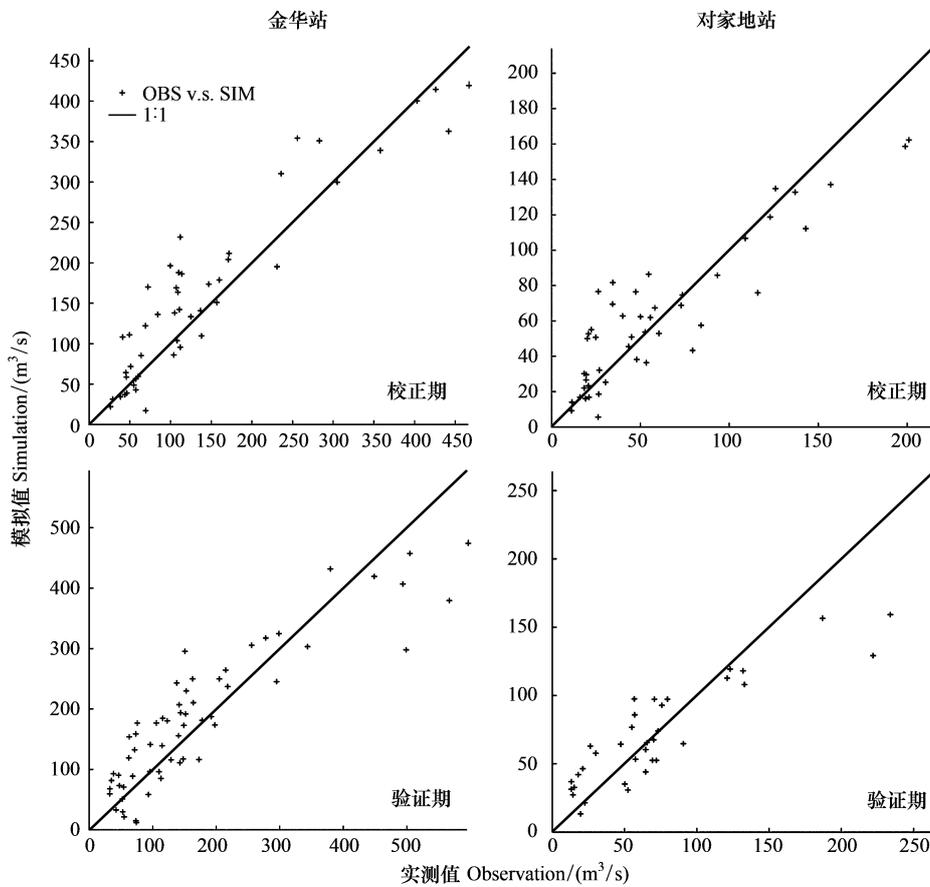


图 3 水文站月径流量实测值与模拟值对比图

Fig.3 Comparison of observed and simulated monthly flow in two hydrological station

A: 金华站; B: 对家地站. a: 校正期; b: 验证期; OBS: 实测值 Observation; SIM: 模拟值 Simulation

燕尾洲公园的生态护堤模式包括以下两类:1) 护堤材质由水泥改为梯田种植带,2) 护堤形态由直壁改为梯田式缓坡。前者包括拆除水泥堤防,种植乡土植物,修复河堤自然生境,建立群落层次;后者指减缓护堤坡度,改斜式堤防为阶梯式。公园生态护堤改造概念图如图 4 所示。

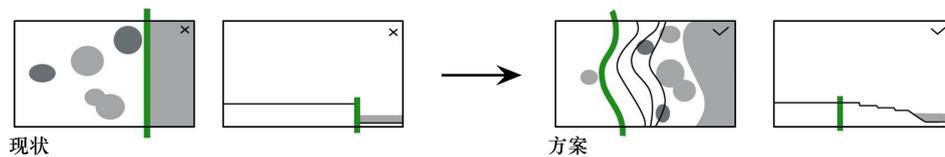


图 4 公园生态护堤改造概念图

Fig.4 The conceptual graphic of Yanweizhou Ecological Embankment

2.2 流域尺度生态护堤模式设计

以燕尾洲公园生态护堤设计模式为参照(图 4),通过单独或同时改变护堤植被覆盖、坡度和改造护堤所占面积比例 3 个护堤设计参数,设计流域尺度不同生态护堤模式。研究提取河道覆被参数(C)、河道形态参数(S)和面积比例参数(A)三组参数进行护堤模式设计与情景模拟。

2.2.1 河道覆被参数设定

生态护堤与水泥堤防在植被覆盖度、土壤下渗性能上均存在明显差异。研究选取河道覆被参数(C)——主河道曼宁系数与主河道有效水力传导率两个参数,共同表达不同护堤的植被覆盖差异。

主河道曼宁系数(又名糙率)是当河道内的水通过过流边界表面时所受的综合阻力^[20]。不同表面的曼宁系数值可通过查阅美国霍尔顿编制的河渠与天然河道糙率表^[29]获得。参照糙率表,结合燕尾洲生态护堤植被类型,与SWAT用户手册建议曼宁系数取值范围^[30],设定研究流域曼宁系数取值。选取0.014(模型默认值)作为水泥堤防的曼宁系数值,0.050(植被稀疏,伴以抛石)作为植被覆盖率低的生态护堤曼宁系数值,0.100(植被茂密,伴以抛石)作为植被覆盖率高的生态护堤曼宁系数值。

主河道有效水力传导率指单位水力梯度下,单位时间内流经单位面积土壤剖面的水量,反映土壤下渗性能。参考SWAT用户手册中主河道有效水力传导率取值范围^[30],可得研究区14种土壤对应有效水力传导率值。

2.2.2 河道形态参数设定

燕尾洲公园将原本硬质堤防拆除,以缓坡梯田式生态护堤替代,河道岸线后退,坡度减缓。研究沿用燕尾洲生态护堤设计思路,改变河道断面形态,设定河道形态参数(S)。研究选取3个坡度梯级:90°(垂直护堤),45°(高坡护堤),和18°(缓坡护堤)进行情景模拟。

在确定护堤坡度后,需要相应地在SWAT模型中调整该坡度下河道溢出时齐岸宽度。在护堤坡度为90°时,河道溢出时齐岸宽度等于河底宽度;坡度为45°时,河道溢出时齐岸宽度=河底宽度+2×河道深度;坡度为18°时,河道溢出时齐岸宽度=河底宽度+2×3×河道深度。

2.2.3 面积比例参数设定

研究同时考虑上述河道覆被因子、形态因子在不同空间尺度上的应用效果。换言之,研究设定面积比例参数(A),在东阳江、武义江的32个子流域中,从上游至下游逐步增加参与生态护堤情景模拟的子流域个数,两条江同步开始增加。

2.2.4 护堤模式设计小结

考虑原始情景与三组因子(C、S、A)的单一及组合效果,设计不同生态护堤模拟情景共计129种(如表2)。在SWAT模型中,在流域尺度,对每种生态护堤情景进行水文过程模拟,模拟次数共计129次。结合燕尾洲建成时间(2014年5月),与所获气象资料(日尺度,截止至2016年12月31日),研究设定情景模拟时间为2012年1月1日—2016年12月31日,模拟精度为日。

3 流域尺度燕尾洲不同护堤模式防洪效应

3.1 不同护堤模式流量过程分析

研究以初始情景(垂直水泥堤防模式)作为基准情景,在此基础上改变参数C、S和A进行2012—2016年日流量过程模拟。模拟方案共计129种。按照表2,将除初始情景(a)之外的128种情景,每16种情景分为一组,共计8组,分别对应于参数A由小至大变化下;b)只改变参数C,植被稀疏,伴以抛石;c)只改变参数C,植被茂密,伴以抛石;d)只改变参数S,45°坡度;e)只改变参数S,18°坡度;f)同时改变参数C、S,45°坡度,稀疏生态护堤,伴以抛石;g)同时改变参数C、S,45°坡度,茂密生态护堤,伴以抛石;h)同时改变参数C、S,18°坡度,稀疏生态护堤,伴以抛石;i)同时改变参数C、S,18°坡度,茂密生态护堤,伴以抛石。加之初始情景,9种生态护堤模式设计下的流量过程线见图5。

由图5可知,a为初始情景,b—f为在某种C、S设定值下,由小至大改变参数A取值时,流域出口断面的流量。b—f中曲线簇的最低流量过程线代表A取值最小——情景1的日尺度流量过程线;曲线簇的最高流量过程线代表A取值最大(即所有子流域均参与生态护堤改造)的日尺度流量。图中阴影面积代表在退水过程中,A的不同取值对同场降水的洪峰削减。由图5可明显看出在A取值变化下,退水曲线变化对河流流量的影响:生态护堤相较水泥堤防而言,能够减小洪峰流量,增加退水过程时洪水流量,从而使洪水过程线更平缓。对于初始情景(水泥垂直堤防模式,图5a),五年日尺度最大洪峰流量发生于2013年10月,接近5a一遇最大洪量;在只改变参数C,A取最大值时,随着主河道曼宁系数由0.050(图5b)增加至0.100(图5c),退水过

程时的流量增加值由 $67.96 \text{ m}^3/\text{s}$ 增加至 $83.70 \text{ m}^3/\text{s}$,五年最大洪峰削减率由 70% 增至 87%。植被覆盖率越高 (C 值越大),洪水过程线越平缓;在只改变参数 S,A 取最大值时,随着护堤坡度由 90° 减为 45° (图 5d) 和 18° (图 5e),流量过程线与初始情景一致,退水过程流量和洪峰流量未发生明显改变。说明改变参数 S 对河道洪峰流量与洪水过程线均无明显影响。

表 2 研究区不同护堤模式情景设定

Table 2 Designed scenarios of various embankment in the study area

情景序号 Scenario name	河道覆被参数 River cover parameter		河道形态参数 River shape parameter		面积比例参数 Area ratio parameter	情景描述 Scenario description
	CH_N	CH_K	CH_SIDE	CH_W		
0	0.014	0	0	河底宽度	全部子流域	模型默认设定,河道坡度为 90° ,材质为硬质堤防
1—16	0.050	对应土壤 K 值	0	河底宽度	1—16	只改变河道覆被因子,生态护堤植被稀疏
17—32	0.100	对应土壤 K 值	0	河底宽度	1—16	只改变河道覆被因子,生态护堤植被茂密
33—48	0.014	0	1	河底宽度 + 2 * 河道深度	1—16	只改变河道形态因子,坡度为 45° ,材质为硬质堤防
49—64	0.014	0	3	河底宽度 + 6 * 河道深度	1—16	只改变河道形态因子,坡度为 18° ,材质为硬质堤防
65—80	0.050	对应土壤 K 值	1	河底宽度 + 2 * 河道深度	1—16	同时改变河道覆被、形态因子,坡度为 45° ,堤防为稀疏生态护堤
81—96	0.100	对应土壤 K 值	1	河底宽度 + 2 * 河道深度	1—16	同时改变河道覆被、形态因子,坡度为 45° ,堤防为茂密生态护堤
97—112	0.050	对应土壤 K 值	3	河底宽度 + 6 * 河道深度	1—16	同时改变河道覆被、形态因子,坡度为 18° ,堤防为稀疏生态护堤
113—128	0.100	对应土壤 K 值	3	河底宽度 + 6 * 河道深度	1—16	同时改变河道覆被、形态因子,坡度为 18° ,堤防为茂密生态护堤

CH_N:主河道曼宁系数 Manning's "n" value for the main channel;CH_K:主河道有效水力传导率 Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium;CH_SIDE:护堤坡度 Channel Side Slope;CH_W:河道溢出时齐岸宽度 Average width of main channel at top of bank

同时改变参数 C 与 S,A 取最大值,逐渐增大 C 值(增大植被覆盖率):曼宁系数由初始情景 0.014 逐渐增为 0.050(图 5f)和 0.100(图 5g)时,退水过程时的流量增加值明显增加约 $15 \text{ m}^3/\text{s}$,退水过程平均流量增加值变化率介于 19.27%—23.16%。结果显示对于退水过程流量的增加,两组参数同时改变较单独改变某一组参数的效果更明显。其中以退水过程平均流量增加值为评价指标,在控制 S 一定,逐渐增大 C 值,参数 C 对退水过程增加的贡献率在 97% 以上,且在 S 取 1 时减小 (99.88%→99.52%),在 S 取 3 时增大 (97.80%→99.02%)。

同时改变参数 C 与 S,A 取最大值,逐渐增大 S 值(减缓护堤坡度):坡度由垂直 90° ,逐渐变为陡坡 45° (图 5h)和缓坡 18° (图 5i)时,退水过程流量增加值变化率介于 0.08%—2.2%,变化率不如图 5f/g 明显。以退水过程平均流量增加值为评价指标,在控制 C 一定,逐渐增大 S 时,参数 C 对退水过程增加的贡献率在 97% 以上,但逐渐减小 (99.88%→97.80%;99.52%→99.02%)。

3.2 不同护堤模式洪峰削减

研究绘制 8 组情景洪峰流量箱线图 (图 6) 和洪峰流量削减表 (表 3)。其中每种情景的第一列为初始情景。

由图 6 和表 3 可知,在单独改变参数 C、S,或组合改变 C 与 S 情况下,逐渐增大 A 值,洪峰流量逐渐降低,年变化范围逐渐减小,当流域内全部采用燕尾洲梯田式生态护堤时,洪峰削减率最大可达 53%—63%。参数

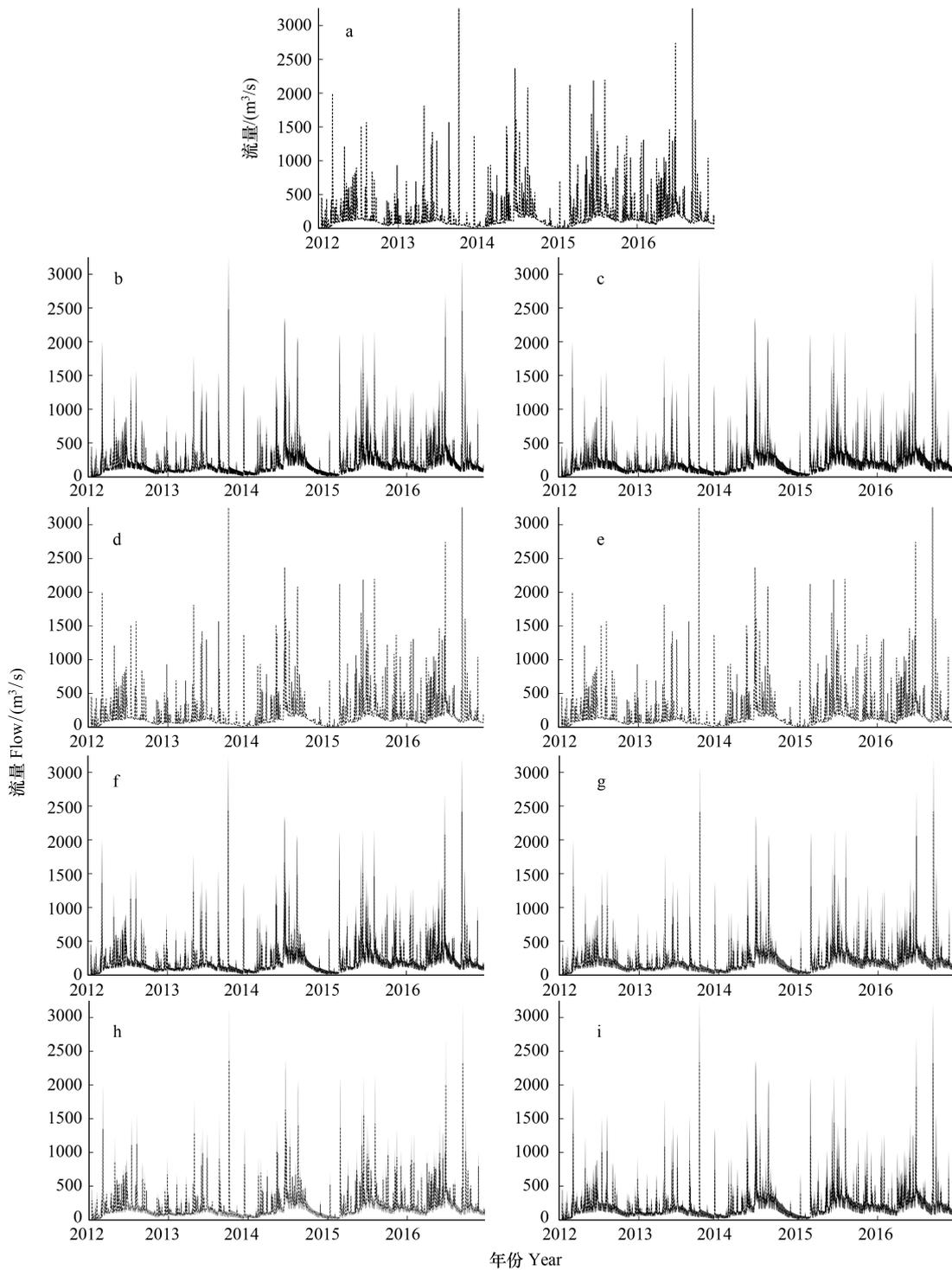


图5 研究流域9组情景日尺度流量过程线(2012—2016年)

Fig.5 The daily flow hydrography of 9 scenarios in 2012—2016

a): 初始情景; b): 情景 1—16; c): 情景 17—32; d): 情景 33—48; e): 情景 49—64; f): 情景 65—80; g): 情景 81—96; h): 情景 97—112; i): 情景 113—128

贡献率分析表明,流域范围内全部以生态护堤替代水泥堤防时,河道覆被参数对年最大一日洪峰削减率的贡献率在 84% 以上,且随植被覆盖率增大、坡度减缓而减小。

对于图 6a—6d:(1) 只改变参数 C 时,随着主河道曼宁系数由 0.050(图 6a)增加至 0.100(图 6b),洪峰年

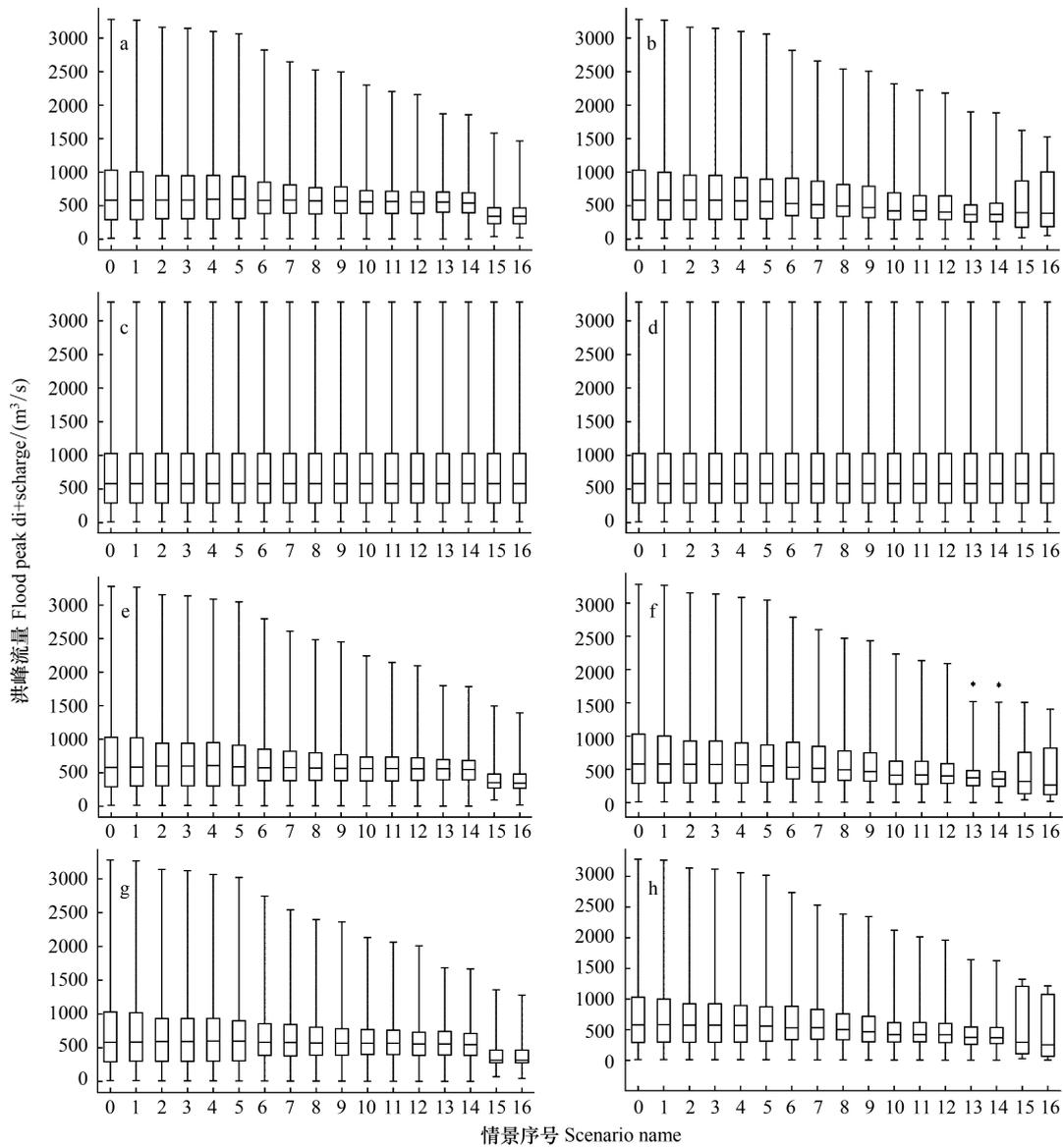


图 6 研究流域 8 组情景洪峰流量箱线图

Fig.6 The flood peak discharge of 8 groups in study area

a):情景 1—16;b):情景 17—32;c):情景 33—48;d):情景 49—64;e):情景 65—80;f):情景 81—96;g):情景 97—112;h):情景 113—128

最大削减率分别为 55%和 53%,均在 50%以上,C 的不同取值对应年最大洪峰削减值较为接近(2%以内);中间模式(6—14)年平均洪峰削减量增大,但全年 50%洪峰流量(四分位距内)变化幅度增加,河道调蓄能力增大,不稳定性同时增加。在只改变参数 C,A 取最大值时,河道调蓄能力增强,且能够在相同雨强下,将流域洪峰流量变化范围严格控制在 1550 m³/s 以内。(2)在只改变参数 S 时,随着护堤坡度由 90°减为 45°(图 6c)和 18°(图 6d),洪峰流量未发生明显改变,故改变水泥堤防坡度对河道洪峰流量削减无明显作用。

对于图 6e—6h:(1)在同时改变参数 C 与 S,曼宁系数由初始情景 0.014 逐渐增为 0.050(图 6e)和 0.100(图 6f)时,结果显示,除 C=0.014 时洪峰流量未有明显削减,C 取值为 0.050 和 0.100 时,洪峰流量变化趋势相同,对应年最大洪峰流量削减率分别为 58%、57%(CH_SIDE = 1),和 61%、63%(CH_SIDE = 3)。可见 S 取值一定,逐渐增大 C 时(C≠0.014),年最大洪峰削减率在 2%范围内波动,但均在 57%以上。(2)在同时改变参数 C 与 S,坡度由垂直 90°逐渐变为陡坡 45°(图 6g)和缓坡 18°(图 6h)时,洪峰流量变化趋势相同,对应年最大洪峰流量削减率分别为 55%、58%、61%(CH_N=0.050),和 53%、57%、63%(CH_N=0.100)。可见 C 取

值一定,逐渐增大S时,年最大洪峰削减率逐渐增大,且均在50%以上。

表3 不同护堤设计情景下洪峰削减表

Table 3 Flood peak reduction table under different embankment design scenarios

改变子流域个数 Changed number of subbasins	情景 1—16 Scenario 1—16		情景 17—32 Scenario 17—32		情景 65—80 Scenario 65—80		情景 81—96 Scenario 81—96		情景 97—112 Scenario 97—112		情景 113—128 Scenario 113—128	
	年最大1日 洪峰流量/ (m ³ /s)	比基准 情况削减										
0	3279		3279		3279		3279		3279		3279	
2	3267	0%	3267	0%	3266	0%	3266	0%	3265	0%	3265	0%
4	3162	4%	3161	4%	3154	4%	3152	4%	3139	4%	3137	4%
6	3146	4%	3145	4%	3137	4%	3135	4%	3120	5%	3118	5%
8	3099	5%	3097	6%	3088	6%	3084	6%	3064	7%	3061	7%
10	3063	7%	3060	7%	3050	7%	3045	7%	3021	8%	3017	8%
12	2821	14%	2818	14%	2795	15%	2787	15%	2743	16%	2736	17%
14	2645	19%	2657	19%	2610	20%	2600	21%	2540	23%	2531	23%
16	2524	23%	2538	23%	2483	24%	2470	25%	2397	27%	2386	27%
18	2496	24%	2505	24%	2452	25%	2433	26%	2362	28%	2345	28%
20	2299	30%	2317	29%	2244	32%	2234	32%	2131	35%	2120	35%
22	2202	33%	2222	32%	2143	35%	2136	35%	2063	37%	2013	39%
24	2157	34%	2180	34%	2095	36%	2090	36%	2009	39%	1961	40%
26	1870	43%	1897	42%	1798	45%	1795	45%	1682	49%	1642	50%
28	1857	43%	1884	43%	1783	46%	1781	46%	1666	49%	1625	50%
30	1581	52%	1623	51%	1495	54%	1506	54%	1357	59%	1323	60%
32	1465	55%	1525	53%	1393	58%	1404	57%	1277	61%	1214	63%

若考虑生态护堤改造成本,则可根据所需洪峰削减率目标值或洪峰流量设定值,参考表3,减少被改造护堤数量。

3.3 不同护堤模式洪水水位调节

研究进一步利用金华江洪峰流量—水位拟合公式,计算129种不同生态护堤情景下流域出口水位。研究区流域出口断面的洪峰流量—水位经验拟合公式如下^[31]:

$$H = 35.6888 + 0.0006F$$

式中, H 为水位(m), F 为洪峰流量(m³/s)。根据识别后洪峰流量值,参照上述公式,计算不同情景下流域出口最高水位。研究时段选取洪水频发的汛期(5—9月),可得汛期洪峰流量对应最高水位(表4)。

表4 情景0—128汛期最高水位表

Table 4 Flood peak stage in flood season for scenarios 1—129

情景 Scenario	水位 Flood peak stage/m							
	1—16	17—32	33—48	49—64	65—80	81—96	97—112	113—128
0	37.64	37.64	37.64	37.64	37.64	37.64	37.64	37.64
1	37.62	37.62	37.64	37.64	37.62	37.62	37.62	37.62
2	37.56	37.58	37.64	37.64	37.55	37.55	37.54	37.54
3	37.55	37.57	37.64	37.64	37.54	37.54	37.53	37.53
4	37.52	37.54	37.64	37.64	37.52	37.51	37.50	37.50
5	37.50	37.52	37.64	37.64	37.49	37.49	37.47	37.47
6	37.36	37.38	37.64	37.64	37.35	37.35	37.31	37.31
7	37.26	37.28	37.64	37.64	37.24	37.25	37.20	37.20
8	37.19	37.21	37.64	37.64	37.17	37.17	37.12	37.12

续表

情景 Scenario	水位 Flood peak stage/m							
	1—16	17—32	33—48	49—64	65—80	81—96	97—112	113—128
9	37.18	37.19	37.64	37.64	37.15	37.15	37.10	37.09
10	37.06	37.08	37.64	37.64	37.03	37.03	36.96	36.96
11	37.01	37.02	37.64	37.64	36.97	36.97	36.90	36.90
12	36.98	37.00	37.64	37.64	36.94	36.94	36.87	36.87
13	36.81	36.83	37.64	37.64	36.77	36.77	36.68	36.67
14	36.80	36.82	37.64	37.64	36.76	36.76	36.67	36.66
15	36.63	36.66	37.64	37.64	36.58	36.59	36.47	36.48
16	36.56	36.60	37.64	37.64	36.52	36.53	36.46	36.42

由表 4 可知,在初始情景下,流域出口断面洪峰水位最大值为 37.64 m,大于金华站危急水位 37.00 m^[32]。当以生态护堤逐步替代水泥堤防时,流域出口洪峰水位最大值可减小至 36.42 m,小于危急水位。

4 讨论

4.1 生态护堤较水泥堤防的洪水削减优势

洪水退水过程时流量计算结果表明,在研究流域内利用生态护堤代替水泥堤防,洪水过程线更为平缓(图 5b,c,f—i),经生态护堤处理过的洪峰流量较水泥堤防更低。随着流域范围内全部以生态护堤替代水泥堤防,日尺度退水过程的洪水流量增加值介于 67.96—83.70 m³/s,即生态护堤能在洪水退水过程时蓄积更多雨水,从而利于修复自然生境,恢复河堤自然系统。此外,河道覆被参数(C)对退水过程平均流量增加值的贡献率在 97%以上,调节该参数对控制退水过程更为有效。

洪水流量削减结果表明,在流域内沿用燕尾洲生态护堤模式代替水泥堤防,可显著削减年最大一日洪峰流量。在研究流域内,相较水泥堤防,采用生态护堤的洪峰削减率最高可达 63%,说明燕尾洲公园护堤模式较水泥堤防有极好的洪水削减作用。Acreman 等人的研究结果也表明,相较生态护堤,洪峰在渠化河道内增加了 50%—150%^[19]。本研究结果与 Acreman 等人的研究结果相似。此外,流域范围内全部以生态护堤替代水泥堤防时,河道覆被参数(C)对年最大一日洪峰削减率的贡献率最高,可达 84%,且随植被覆盖率增大、坡度减缓而减小。因此,可通过调控 C 参数来显著减小流域洪峰流量。

4.2 汛期燕尾洲公园水位调节验证

在获得 129 种护堤情景下的汛期流域最高水位后,研究参考燕尾洲生态护堤的 DEM,结合模拟水位结果,绘制以生态护堤替代水泥堤防的水位调控效果。燕尾洲公园位于流域出口,其在不同情景下的淹没范围可由研究流域出口水位估算得出。不同情景下燕尾洲公园(即流域出口)淹没范围如图 7 所示。

如图 7,以燕尾洲公园红线为边界,其内淹没区可分为三类:(1)一级淹没区:该区域会被所有情景下研究时段内最大洪水淹没。表明公园生态护堤及内部场地在所有情景的最大洪峰下均保持完好,仅洲头湿地被淹没;(2)二级淹没区:该区域会被 108 种情景下研究时段内最大洪水淹没。此时仅有第四层梯田和洲头被淹没,内部场地和其余梯田台地保持完好;(3)三级淹没区:该区域在所有情景下均不会被淹没。即护堤第三级以上及所围合中心区在所有情景下均不会被淹没。

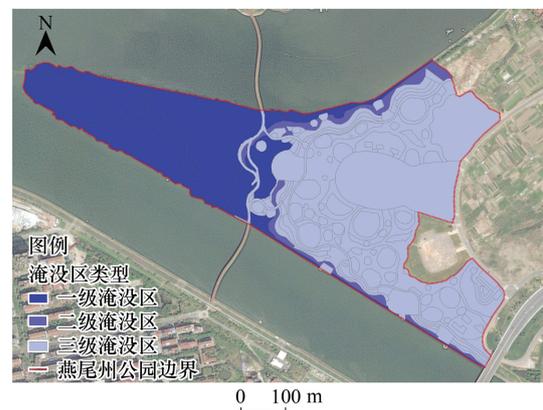


图 7 不同情景下燕尾洲公园淹没范围图

Fig.7 The submerged area of Yanweizhou Park under 129 scenarios

该结果表明,燕尾洲公园生态护堤能够成功抵御模拟年份内所有场次洪水,且能够有效避免河道的硬化和白化,具有较强的推广应用价值。

5 结论

本研究以金华江流域为研究区,以燕尾洲公园生态护堤设计模式为典型,自行设计流域不同生态护堤模式,运用 SWAT 模型模拟不同护堤模式下退水过程的流量改变、洪峰削减与水位调节效果。研究表明,利用生态护堤代替水泥堤防,洪水过程线更为平缓,流域内年最大一日洪峰削减率最高可达 63%,燕尾洲公园生态护堤模式较水泥堤防有良好的洪水削减作用。在未来研究中,如何模拟燕尾洲护堤形态外其他护堤模式的流域防洪效应,是需要进一步探讨的问题。

参考文献 (References):

- [1] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change. [2018-11-15]. https://wg1.ipcc.ch/srex/downloads/SREX-All_FINAL.pdf.
- [2] Peduzzi P. Flooding: prioritizing protection? *Nature Climate Change*, 2017, 7(9): 625-626.
- [3] Liu Z D, Li J, Zhang Y, Ding G Y, Xu X, Gao L, Liu X N, Liu Q Y, Jiang B F. Distributed lag effects and vulnerable groups of floods on bacillary dysentery in Huaihua, China. *Scientific Reports*, 2016, 6: 29456.
- [4] Li X G. A new method to evaluate floodwater for control/use in high-sediment rivers of Northwest China. *Scientific Reports*, 2017, 7: 17219.
- [5] 陈秀万. 中国洪水灾害分析. *海洋地质与第四纪地质*, 1995, 15(3): 161-167.
- [6] Hallegatte S, Green C, Nicholls R J, Corfee-Morlot J. Future flood losses in major coastal cities. *Nature Climate Change*, 2013, 3(9): 802-806.
- [7] Alfieri L, Feyen L, Dottori F, Bianchi A. Ensemble flood risk assessment in Europe under high end climate scenarios. *Global Environmental Change*, 2015, 35: 199-212.
- [8] Kabat P, Fresco L O, Stive M J F, Veerman C P, van Alphen J S L J, Parmet B W A H, Hazeleger W, Katsman C A. Dutch coasts in transition. *Nature Geoscience*, 2009, 2(7): 450-452.
- [9] Temmerman S, Meire P, Bouma T J, Herman P M J, Ysebaert T, De Vriend H J. Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. *Nature*, 2013, 504(7478): 79-83.
- [10] 赵本良, 章家恩, 梁开明, 孔旭晖, 叶延琼, 苏怡娟. 广州市典型河涌生态堤岸的调查分析及改进对策. *生态科学*, 2014, 33(2): 390-395.
- [11] 李长安. 基于“人-水-地和谐”的长江堤防功能. *地球科学-中国地质大学学报*, 2015, 40(2): 261-267.
- [12] Evette A, Zanetti C, Cavaille P, Dommanget F, Mériaux P, Vennetier M. The paradox when managing the riparian zones of rivers with engineered embankments in The French prealps: safety management or the promotion of biodiversity. *Revue de Géographie Alpine*, 2014, 102(4): 2-13.
- [13] SCAPE 景观设计公司. 有生命的防波堤—纽约沿海绿色基础设施. *景观设计学*, 2017, 5(4): 96-109.
- [14] 赵华, 庞晓丽, 张超. 城市水系的生态堤岸设计. *北京林业大学学报: 社会科学版*, 2010, 9(2): 94-100.
- [15] Tockner K, Schiemer F, Ward J V. Conservation by restoration: the management concept for a river-floodplain system on the Danube river in Austria. *Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems*, 1998, 8(1): 71-86.
- [16] 张谊. 论城市水景的生态驳岸处理. *中国园林*, 2003, (1): 52-54.
- [17] 冯一民. 我国城市河流堤岸景观规划模式初探. *中国水利*, 2009, (4): 13-16.
- [18] 孙鹏, 王志芳. 遵从自然过程的城市河流和滨水区景观设计. *城市规划*, 2000, 24(9): 19-22.
- [19] Acreman M C, Riddington R, Booker D J. Hydrological impacts of floodplain restoration: a case study of the River Cherwell, UK. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2003, 7(1): 75-85.
- [20] 刘静. 城市河道生态景观对防洪影响的数值研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [21] 郭秋峰. 河道生态护坡在腊山分洪工程中的应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [22] 俞孔坚, 俞宏前, 宋昱, 周水明. 弹性景观—金华燕尾洲公园设计. *建筑学报*, 2015, (4): 66-70.
- [23] 郑海霞, 张陆彪, 封志明. 金华江流域生态服务补偿机制及其政策建议. *资源科学*, 2006, 28(5): 30-35.
- [24] 张健全. 基于人工神经网络的集合洪水预报研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [25] 朱建宏, 刘艳伟. 编制金华站洪水预报模型的几点探索. *浙江水利科技*, 2002, (5): 31-33.
- [26] 刘学华, 韩兴, 梁亮. 金华市汛期降水特征分析及年际年代际差异. *科技通报*, 2008, 24(6): 762-767.
- [27] Ogden F L, Lai W C, Steinke R C, Zhu J T. Validation of finite water - content vadose zone dynamics method using column experiments with a moving water table and applied surface flux. *Water Resources Research*, 2015, 51(5): 3108-3125.
- [28] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, Bingner R L, Harmel R D, Veith T L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885-900.
- [29] 佚名. 渠道及天然河道的粗糙系数 n 值表. (2011-10-28) [2019-02-24]. <https://wenku.baidu.com/view/a400a50d7cd184254b35351e.html?sxts=1524323474321>.
- [30] Arnold J G, Kiniry J R, Srinivasan R, Williams J R, Haney E B, Neitsch S L. SWAT Input/Output Documentation Version 2012. Texas: Texas Water Resources Institute, 2012.
- [31] 郭文扬, 余良球, 杨明仁, 丰根清. 金华市洪涝灾害初步分析. *浙江气象科技*, 1990, 11(2): 42-43.
- [32] 金华防汛实时信息发布系统. [2019-02-24]. <http://60.191.198.108:8086/map/FloodPublish.aspx? MenuId=18>.