

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222420

基于 SWMM 和 LISFLOOD-FP 模型的居住区 低影响开发模拟评价

胡金辉^{a,b}, 韩铭洋^{a,b}, 吴泽新^{a,b}, 徐莫然^{a,b}, 孙颖娜^{a,b}

(黑龙江大学 a. 水利电力学院; b. 中俄寒区水文水利工程联合实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:为解决一维 SWMM 模型难以直观展示研究区淹没深度及范围的问题,以布莱顿市城区某居住区为例,利用 SWMM 模型耦合 LISFLOOD-FP 二维水动力模型对该居住区低影响开发改造之前的内涝情况进行分析并制作淹没范围和水深图,设计了三种不同的低影响开发(LID)方案(单一绿色屋顶方案、单一透水铺装方案、组合方案)对居住区进行改造。结果表明,淹没范围与实际易发生的内涝点相吻合,表明二维耦合模型具有较高的可靠性,三种低影响开发方案均能有效消除溢流节点,降低径流峰值,延缓峰值出现时间和退水时间,对提升城区排涝改造技术具有重要意义。

关键词: SWMM; LISFLOOD-FP; 低影响开发; 耦合模型; 内涝

中图分类号: X52; TV122.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)09-0068-05

1 引言

伴随着经济全球化的发展,城市化进程不断加快,城市的规模持续增长,然而城市建设规划存在许多不合理处。近年来,城市内涝的频率与强度呈现出增长趋势,内涝灾害频发,国内大中城市接连遭受内涝灾害影响^[1,2]。快速工业化和城市化导致的自然水循环系统发展演化和城市水问题恶化引发了严重的城市病,人们开始更多关注城市生态环境系统的可持续发展与健康^[1]。通过建立城市雨洪模型对城市内涝问题进行模拟,已成为城市暴雨内涝研究的重要手段^[3]。随着 SWMM 模型在水质模拟方面的功能被开发与认可,低影响开发方面逐渐受到人们的重视^[4]。SWMM 模型的优势在于免费、开源、模拟效果好,但水动力模型功能有限,仅局限于一维管网汇流计算,缺少二维管网模型模块^[2]。较多的研究是利用节点的积水深度来代替局部积水深度,依靠经验公式来估计淹没范围,这些均无法定量定性的展示淹没范围,对内涝的机理与过程无法做到十分准确的描述^[5]。在模拟城市暴雨内涝中淹没水深和淹没范围方面,耦合模型发挥着重要作用

用,兼具有一维和二维模型的优点,模拟效果良好生动,能够全面反映出城市内涝情况^[6]。在众多耦合模型中,LISFLOOD-FP 二维模型应用性强、使用价值高,但目前对该模型的使用较少^[6]。为此,本文利用 SWMM 模型与 LISFLOOD-FP 二维水动力模型耦合,采用模拟降雨对布莱顿市居住区进行水文建模、优化和低影响开发(LID),定性定量地分析淹没范围和对应的水深,以期为城区雨洪治理提供参考。

2 SWMM 与 LISFLOOD-FP 耦合简介

SWMM 模型是目前使用成熟且应用广泛的的城市雨洪模型,可用于场次径流和长期模拟。该模型具有地表产汇流、管网一维水动力与水质模拟、LID 设施规划等多种水文功能。其中,产流计算可应用 Horton、Green-Ampt、SCS 径流曲线法;地表汇流计算主要应用非线性水库法;管网汇流计算可使用恒定流法、运动波法和动力波法,且具有免费、方便用户操作学习等优势。

LISFLOOD-FP 模型是一个可模拟洪水淹没的二维管道水动力模型,该模型以 DEM 网格为地形划分单元,运用动量方程和连续性方程来模

收稿日期: 2022-11-16, **修回日期:** 2022-12-14

基金项目: 黑龙江省大学生创新创业训练计划项目(202110212033)

作者简介: 胡金辉(1998-),男,硕士研究生,研究方向为水资源与水环境,E-mail: 809245298@qq.com

通讯作者: 孙颖娜(1972-),女,教授,研究方向为工程水文学,E-mail: 26787238@qq.com

拟积水过程与径流的时空演变过程,构建难度不大,计算效率较快^[7]。该模型预测每个网格单元在每个时间步长的水深,可模拟洪水波在河流、海岸和河口漫滩上的传播^[6]。

本文通过构建 SWMM 模型获得溢流节点的流量过程,以此为 LISFLOOD-FP 模型的输入文件,模拟得出淹没水深和范围,具体流程见图 1。

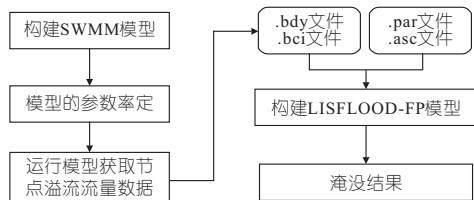


图 1 耦合流程图

Fig. 1 Coupling flow chart

3 研究区概况及模型构建

3.1 研究区概况

布莱顿市城区某居住区位于英格兰南部的一座海滨城市,属温带海洋型阔叶林气候,气候温度为-10~32℃,平均年降水量超过 1 100 mm,山区年降水量可达 2 000~4 000 mm,气候湿润多雨。将该研究区划分为 16 个子汇水区,管道系统位于市区主要道路下方,见图 2。



图 2 布莱顿市的城市场集水区和下水道系统

Fig. 2 Urban catchment and sewer system in Brighton

3.2 模型构建与验证

3.2.1 SWMM 模型构建

SWMM 模型的构建步骤如下。

步骤 1 对模型参数、坐标进行设定,包括时间布长、动力波方程等基础参数。

步骤 2 将研究区域的地形图以添加底图的方式输入到工作区中,根据其街道分布、土地利用情况划分子汇水区。

步骤 3 设置出水口的位置、径流路径方向,对验管网数据和检查井数据进行概化。

步骤 4 将节点、管道、子汇水区数据包括管

道特征、高程、坡度、不透水率、霍顿入渗系数输入模型中,生成.inp 文件。

概化模型最终划分出 16 个子汇水区,其中子汇水区 7 面积最大为 1.01 hm²,子汇水区 3 面积最小为 0.32 hm²,并概化出 24 个节点,24 条管段,研究区出水口设为节点 17,见图 3,各子汇水区参数见表 1。

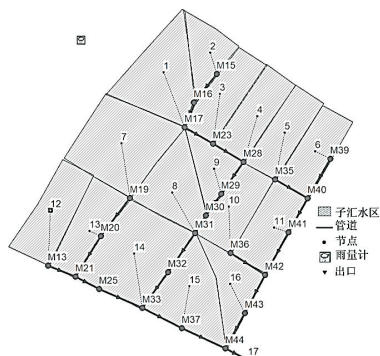


图 3 研究区建模概化图

Fig. 3 Overview of modeling in the study area

表 1 子汇水区属性

Tab. 1 Sub catchment area properties

子汇水区	坡度 /%	不透水百 分比/%	下渗速率/(mm·h ⁻¹)		干燥 常数
			最大	最小	
1~6,10,11	2	90	95	15	2
7~9	2	60			
12~16	3	55			

3.2.2 参数率定与验证

由于缺乏实测资料,考虑采用综合径流系数法进行参数率定。综合径流系数法是将模拟所得径流系数与研究区综合径流系数对比。研究区域综合径流系数 ψ 按表 2 取值,计算式为:

$$\psi = \frac{1}{F} \sum F_i \psi_i \quad (1)$$

式中, F_i 为第 i 个子汇水区面积, hm²; ψ_i 为第 i 个子汇水区的综合径流系数; F 为研究区总面积, hm²。

由式(1)最终得到研究区平均综合径流系数为 0.67,将两次模拟降水数据输入模型,得到模拟的径流系数分别为 0.73、0.75,误差分别为 6%、11%,满足要求,表明所构建的 SWMM 模型对设计降雨的分析具有可靠性。

表 2 径流系数取值范围

Tab. 2 Range of runoff coefficient

区域类型	不透水面积率/%	综合径流系数
建筑稠密的中心区	>70	0.6~0.8
建筑较密的居住区	50~70	0.5~0.7
建筑较稀少的居住区	30~50	0.4~0.6
建筑很稀少的居住区	<30	0.3~0.5

3.3 耦合模型评估场地现状

LISFLOOD-FP 模型的运行需要 .bci、

. bdy、. asc、. par 四个文件,其中. bci、. bdy 是耦合模型运行的关键文件。在 SWMM 中筛选模拟之后出现溢流的节点并获取溢流量与溢流时间的关系,将其导出作为 LISFLOOD-FP 模型的输入数据,见表 3。

表 3 场地改造前的节点溢流过程

Tab. 3 Node overflow process before site reconstruction

时间	M23	M29	M33	M35	M36	M37	M41
0:25:00	0	0	0	0	0	0	0
0:30:00	0	0	0	0	0	0	0
0:35:00	0.14	0	0	0.07	0.09	0.15	0.09
0:40:00	0.24	0	0.35	0.08	0.11	0.44	0.15
0:45:00	0.24	0.01	0.5	0.09	0.11	0.46	0.15
0:50:00	0.03	0	0.07	0.02	0.05	0.44	0.02
0:55:00	0	0	0	0.02	0.04	0.33	0
1:00:00	0	0	0	0.02	0.04	0.32	0
1:05:00	0	0	0	0	0.01	0	0
1:10:00	0	0	0	0	0	0	0
1:15:00	0	0	0	0	0	0	0
1:20:00	0	0	0	0	0	0	0

将表 3 按“P+X 坐标+Y 坐标+QVAR+溢流节点名称”格式进行整理,生成. bci 文件,. bci 文件指定边界条件及坐标信息,各个溢流节点的坐标可在 SWMM 模型的. inp 文件读取,见图 4。

points	seconds	DEMfile	dem.ascii
M23	0	resroot	res
37	0	dirroot	results
0	0	sim_time	10800.0
0	300	initial_tstep	1.0
0	600	massint	100.0
0	900	saveint	300.0
0	1200	#checkpoint	0.00001
0	1500	overpass	100000.0
0	1800	fpifrc	0.012
0.07	2100	infiltration	0.00001
0.12	2400	#overpassfile	buscot.opt
0.12	2700	#manningfile	buscot.n.ascii
0.015	3000	#riverfile	buscot.river
0	3300	bcifile	nodeflooding.bci
0	3600	bdyfile	nodeflooding.bdy
		#weirfile	buscot.weir
		#stairfile	res.old
		#stagefile	buscot.stage
		bdy 文件	.par 文件
P 279.224	251.194	QVAR	M23
P 289.233	190.659	QVAR	M29
P 193.904	52.908	QVAR	M33
P 354.534	208.295	QVAR	M35
P 300.673	119.162	QVAR	M36
P 241.569	28.599	QVAR	M37
P 370.74	144.424	QVAR	M41

图 4 LISFLOOD 运行文件格式

Fig. 4 Format of LISFLOOD running file

. bdy 文件是指定并链接. bci 文件中的时变边界文件,是各节点溢流流量过程。将表 3 按图 4 的格式进行整理,生成. bdy 文件。利用 ArcMap 将研究区的 DEM 数据转化为. asc 格式将其作为模型运行的地形文件。

最后将准备好的文件写入. par 文件中,在. par 文件中指定. bci、. bdy、. asc 文件,“#”代表计算时会忽略该行,见图 4。在 lisflood. exe 程序中运行. par 文件即可完成 LISFLOOD-FP 建模及耦合工作。

在 ArcMap 中打开 LISFLOOD-FP 结果文件可查看研究区域的淹没面积及淹没深度情况,在 ArcMap 中处理后的最终淹没结果见图 5。

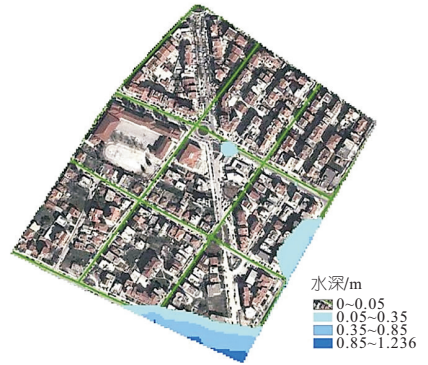


图 5 淹没模拟结果

Fig. 5 Results of inundation simulation

研究区南部和东部部分区域在降雨后存在内涝情况,具体淹没面积见表 4。小区南部和东部由于地势较低且紧接市政管网为降水后的易涝点,是研究区发生内涝严重的区域,模拟结果图能反映实际的淹没情况,具有较好的准确性。

表 4 淹没信息统计

Tab. 4 Statistics of inundation information

水深 /m	栅格 计数	面积/m ²	水深 /m	栅格 计数	面积/m ²
0~0.05	41 167	87 566. 770	0.35~0.85	522	1 110. 352 0
0.05~0.35	854	1 816. 553	0.85~1.236	97	206. 329 7

4 LID 方案设计与结果分析

4.1 LID 方案设计

根据研究区的土地利用情况布设 LID 设施,见表 5。本文所建模型的 LID 设施为绿色屋顶和透水道路,相关参数见表 6。绿色屋顶的布设可缓解强降水带来的屋顶径流压力,更能够过滤渗透雨水冲刷所带来的污染物。透水铺装能够解决由于地面硬化造成的地面不透水问题,缓解地面积水压力,帮助雨水通过路面空隙渗透至土壤。

表 5 屋顶与道路占比统计

Tab. 5 Proportion statistics of roofs and roads

子汇水区	不透水区	屋顶占不透	道路占不透
	面积占比/%	透区比例/%	透区比例/%
1~6,10,11	90	60	17
7~9	70	40	15
12~16	45	70	20

四种 LID 方案分别为传统无 LID 布设方案、只布设绿色屋顶方案、只布设透水路面方案、绿色屋顶和透水路面的组合布设方案。每个 LID 方案均采用最大可能改造面积进行改造,并尽可能多地将被改造不透水区域的径流排入 LID 区域,将所有超标径流从 LID 设施和不透水区域排入透水区域,最后再进入雨水管网。

4.2 不同 LID 措施的布设结果分析

4.2.1 雨洪控制(研究区总径流量)评价

径流过程随时间变化过程见图 6,设置模拟

表 6 LID 设施相关参数取值

Tab. 6 Values of LID facility related parameters

结构层	参数	透水铺装	绿色屋顶	
表层	蓄水深度/mm	20	150	
	植被覆盖率	0	0.15	
	表面粗糙系数	0.15	0.24	
	表面坡度/%	0.6	1	
	草边挖坡			
铺装层	厚度/mm	160		
	孔隙比	0.15		
	不透水表面系数	0		
	渗透性/(mm·h ⁻¹)	250		
	堵塞因子	0		
土壤层	厚度/mm		200	
	孔隙比		0.3	
	产水能力		0.2	
	枯萎点		0.1	
	导水率		45	
	导水率坡度		10	
	吸水头/mm		3.5	
	蓄水层	高度/mm	200	
		孔隙比	0.7	
导水率		250		
堵塞因子		0		
底部排水层	厚度			
	孔隙率			
	粗糙度			
	排水系数/(mm·h ⁻¹)		16	
	排水指数		0.5	
	偏移量/mm		6	

时长为 6 h,前 2 h 为设计降雨历时,后 4 h 为退水时间。三种 LID 改造方案与无 LID 方案相比均能显著地降低洪峰流量,推迟峰值出现时间,延缓退水时间。其中,方案 1 无 LID 设施下洪峰流量可达 5.17 m³/s,径流峰值出现时间为 60 min;方案 2 绿色屋顶单项布设下洪峰流量为 3.0 m³/s,径流峰值出现时间为 69 min;方案 3 透水铺装单项布设下洪峰流量为 3.3 m³/s,径流峰值出现时间为 70 min;方案 4 组合 LID 布设下洪峰流量为 1.55 m³/s,径流峰值出现时间为 73 min。

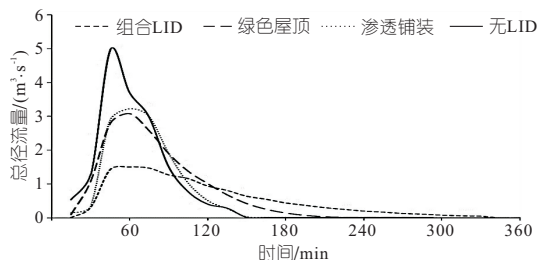


图 6 不同方案径流量对比结果

Fig. 6 Runoff comparison results of different schemes

透水铺装方案能削减 36% 的峰值流量,绿色屋顶方案能降低 42% 的峰值流量并使得径流峰值延迟 9 min,组合 LID 方案能够降低 70% 的峰值流量,延后峰值出现时间 13 min,组合方案的退水时间最长为 280 min。可见方案 4 > 方案 2 > 方案 3 > 方案 1, LID 组合布设方案雨洪控制效果最佳,其次为绿色屋顶、透水铺装。

4.2.2 内涝点分析评价

选取改造前发生积水严重的四个节点 M23、M35、M36、M37,对比分析改造前后的最大的节点水位。所有的节点设置最大深度为 1.5 m,当水位等于 1.5 m 时,表明该处已产生溢流现象,当水位低于 1.5 m 时则不会发生溢流,模拟结果见图 7。

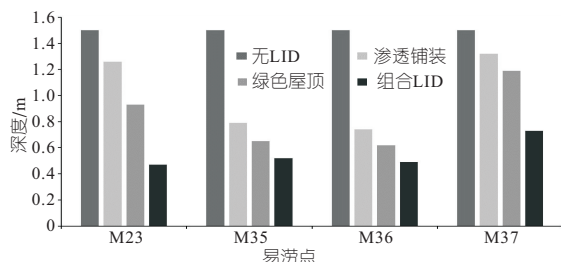


图 7 易涝点水深情况

Fig. 7 Water depth at waterlogging vulnerable points

由图 7 可知,单一透水铺装布设下,易涝点 M23、M35、M36、M37 积水深度分别为 1.25、0.80、0.75、1.30 m;单一绿色屋顶布设下,易涝点 M23、M35、M36、M37 积水深度分别为 0.92、0.70、0.60、1.20 m。组合方案消减效果更佳,易涝点 M23、M35、M36、M37 深度分别为 0.48、0.50、0.48、0.72 m,分别降低了 68%、66%、68%、52%。三个 LID 改造方案均能有效缓解管网的排水压力,改造后均能有效消除溢流节点,缓解降雨后研究区域的内涝情况。M35、M36 节点所在的区域为高密度的居住区,通过 LID 改造后效果更为明显。

5 结论

a. 本文介绍了 SWMM 与 LISFLOOD-FP 耦合模型的原理及建模过程,并以布莱顿市城区某居住区为例通过耦合模型评估改造之前的内涝状况。结果表明,居住区南部和东部淹没范围及水深较大,与实际易涝点的位置相吻合,表明耦合模型具有可靠性,能较好地评估降雨后场地的内涝情况,解决了 SWMM 模型无法直观查看淹没范围和淹没深度的问题。

b. 本文设计并对比了三种 LID 方案,单一绿色屋顶方案较单一透水铺装方案的雨洪调控能力更强,能削减 42% 的洪峰流量,组合的 LID 方案比单一的 LID 方案效果更好,能削减 70% 的峰值流量。LID 设施能有效地缓解城市内涝问题,显著地降低了研究区总径流的峰值,延缓峰值出现时间,延缓退水过程,有效降低城市雨水管网运行压力。

参考文献:

[1] 徐宗学,程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础——城市水文学研究进展 [J]. 水利学报, 2019, 50(1): 53-61.

[2] 夏军,张印,梁昌梅,等. 城市雨洪模型研究综述 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(2): 95-105.

[3] 刘勇,张韶月,柳林,等. 智慧城市视角下城市洪涝模拟研究综述 [J]. 地理科学进展, 2015, 34(4): 494-504.

[4] 周宏,刘俊,高成,等. 考虑有效不透水下垫面的

城市雨洪模拟模型——II. 雨洪模拟及水文响应分析 [J]. 水科学进展, 2022, 33(3): 485-494.

[5] 周文琦,俞芳琴,刘俊,等. LID 措施对城南河流域水质改善效果研究 [J]. 江苏水利, 2021(1): 39-44.

[6] 曾照洋,王兆礼,吴旭树,等. 基于 SWMM 和 LISFLOOD 模型的暴雨内涝模拟研究 [J]. 水力发电学报, 2017, 36(5): 68-77.

[7] 李鹏,徐宗学,赵刚,等. 基于 SWMM 与 LISFLOOD-FP 模型的城市暴雨内涝模拟——以济南市为例 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(6): 1083-1092.

Low-impact Development Design and Evaluation of Residential Areas Based on SWMM and LISFLOOD-FP Models

HU Jin-hui^{a,b}, HAN Ming-yang^{a,b}, WU Ze-xin^{a,b}, XU Mo-ran^{a,b}, SUN Ying-na^{a,b}

(a. School of Hydraulic and Electric Power; b. Sino-Russian Cold Region Hydrology and Hydraulic Engineering Joint Laboratory, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to solve the problem that the one-dimensional SWMM model is difficult to visually display the submerged depth and range of the study area, taking a residential area in Brighton as an example, the SWMM model coupled with the LISFLOOD-FP two-dimensional hydrodynamic model has a low impact on the residential area. The waterlogging situation before the development and renovation was analyzed and the inundation range and water depth map were made, and three different low-impact development (LID) schemes (single green roof scheme, single permeable pavement scheme, and combination scheme) were designed to transform the residential area. The results show that the inundation range is consistent with the actual waterlogging points, which shows that the two-dimensional coupling model has high reliability, and the three low-impact development schemes can effectively eliminate overflow nodes, reduce runoff peaks, and delay peak occurrence time and water receding time, which is of great significance to improve urban drainage and reconstruction technology.

Key words: SWMM; LISFLOOD-FP; low impact development; coupled model; waterlogging



(上接第 50 页)

[2] 水利部长江水利委员会. 以三峡水库为核心的长江干支流控制性水库群综合调度研究[R]. 武汉:水利部长江水利委员会, 2011.

[3] 李书飞,陈肃利,何小聪. 水库群联合防洪调度系统建设关键技术:以金沙江下游梯级和长江三峡水库为例[J]. 水电与新能源, 2014(2):1-5.

[4] 杨春花,许继军,董玲燕. 金沙江下游梯级水库配合三峡水库联合防洪调度效果分析[J]. 长江科学院报, 2010, 27(10):5-9.

[5] 贾本有,钟平安,陈娟,等. 复杂防洪系统联合优化调度模型[J]. 水科学进展, 2015, 26(4): 560-571.

[6] 冯仲恺,廖胜利,牛文静,等. 改进量子粒子群算法在水电站群优化调度中的应用[J]. 水科学进展, 2015, 26(3):413-422.

[7] 文小浩,张勇传,钮新强,等. 溪洛渡,向家坝水库配合三峡水库对城陵矶防洪调度优化研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(6):71-74.

[8] 陈芳. 金沙江下游梯级水库群优化调度研究及应用[D]. 武汉:华中科技大学, 2017.

Research on Flood Control Storage Capacity Distribution Method of Cascade Reservoirs in the Lower Reaches of the Jinsha River

WANG Wei¹, JU Bin², WANG Peng-fei¹, OUYANG Qiu-ping¹

(1. China Three Gorges Construction Engineering Corporation, Chengdu 610095, China;

2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: In order to maximize the comprehensive benefits of cascade reservoirs in the lower reaches of the Jinsha River, it is necessary to study the application mode of joint flood control scheduling. Adopting the flood process in different areas with the incoming water from the Jinsha River and the Minjiang River as the mainstay, the flood regulation calculation, flood control analysis, flood control storage capacity utilization, and cascade power generation benefit calculation of the cascade reservoirs in the downstream of the Jinsha River were studied by using relevant mathematical analysis methods. The flood control distribution method of the cascade reservoirs in the lower reaches of the Jinsha River to meet the goal of flood prevention in the Chuanjiang River was studied. The research results show that on the premise of meeting the flood control requirements of the downstream Chuanjiang River, from the perspective of making full use of flood resources and increasing the overall power generation benefits of cascade power stations, in the distribution and dispatching of flood control, it is recommended that the order of flood control storage capacity utilization of cascade reservoirs downstream of the Jinsha River is as follows: Wudongde Reservoir, Xiluodu Reservoir, Baihetan Reservoir. The research results can provide references for rational and scientific flood control operation of cascade reservoirs in the lower reaches of the Jinsha River and similar basins.

Key words: the lower reaches of Jinsha River; cascade reservoirs; flood control storage capacity distribution method; joint flood control operation