

张小霞, 施文婧, 沈福新, 等. 基于洪水风险图的避洪转移分析方法研究[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 222–229. [ZHANG Xiaoxia, SHI Wenjing, SHEN Fuxin, et al. Flood Evacuation Analysis Study Based on Flood Risk Map[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(3): 222–229. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.03.037.]

基于洪水风险图的避洪转移分析方法研究^{*}

张小霞¹, 施文婧², 沈福新², 张新华¹

(1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120)

摘要: 避洪转移作为常见的非工程措施, 在国内外洪灾应急减灾中发挥了巨大的作用。为更好的发挥洪水风险图的作用并探索其在中存在的问题, 参考洪水风险图编制导则(SL 483-2010)及洪水风险图示例, 将洪水风险图与洪泛区现状结合起来, 对洪水影响区域的转移需求; 安置点(包括安置点需求、合理性、容量等)和安置点分配及转移起点到安置点之间多对多的最佳转移路径优选等关键问题提出了相应的分析方法。以沂河左岸朱家庙50年一遇溃堤洪水风险图为例, 验证了分析方法的合理性和可行性。

关键词: 洪水风险图; 避洪转移; 转移需求; 应急安置; 多对多路径优选;

中图分类号: X43; P28; TV877 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2017)03-0222-08

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.03.037

防洪减灾是一个世界性的课题, 全世界大约有1%~2%的陆地^[1]每年都会遭受洪水灾害。在雪灾、暴雨雪、冰雹、暴风、洪水、旱灾、地震、洪涝、台风和龙卷风等10种主要自然灾害中, 如果说地震灾害导致伤亡人数最多, 气象灾害的危害最广、影响最大, 那么, 洪涝灾害则是损失最严重的自然灾害。据统计在所有自然灾害中, 洪灾损失率最大, 高达60%以上^[2]。损失严重性使得洪水灾害受到各国的高度重视, 而其损失值还随着经济社会的发展不断增加。根据联合国和世界银行1970-2008年的统计数据^[3], 大部分国家的洪水灾害损失水平平均随着经济规模的不断扩大而大幅增长。

我国的洪灾损失远高于世界平均水平。约有2/3的国土面积存在不同程度的洪水灾害, 年均损失在1000亿元以上, 约占全国GDP的1%~3%。统计资料表明, 在1990-2010年期间, 世界十大洪水灾害中, 中国占40%。而且中国的洪灾损失远远超出其他世界级大洪灾的损失, 如果按死亡人口排序, 则在1990-2010年间世界头四大洪灾均发生在中国, 此四大洪灾死亡人数在2600~4200人之间, 远远超出了其他世界性洪水灾害。

为改变这一现状我国正积极开展洪灾相关研究, 从各级防汛指挥部门的建设、体制机制健

全、基本资料收集、洪水风险图制作、山洪灾害防御试点等工程和非工程措施方面均做了大量工作, 已取得较为丰富的成果。洪水减灾的非工程措施研究达到了高潮^[4], 但是当前应用我国洪水风险图指导避洪转移安置点配置及路径选取等问题还很少有研究开展。

1 避洪转移在洪水风险管理中的作用

中国洪水管理战略将洪水风险定义为危险性(指洪水致灾的自然特性)、承灾体(指可能因洪灾淹没或影响的人口和资产)以及脆弱性(指承灾体的抗灾性能)的乘积^[5]。即洪涝灾害的危害性由危险性、承灾体和承灾体的脆弱性三方面因素决定。洪水风险管理行为, 其目标均是应对洪水风险的三个因子。图1中列举了目前针对不同的危害性因子常用的减轻洪灾损失的措施。其中针对洪水危险性的减灾措施通常都是工程措施, 而针对承灾体及其脆弱性的减灾措施可归类为非工程措施。

常见的非工程措施有: 洪水保险、防洪立法、土地利用管理、洪水风险教育、洪水预警预报、避洪转移等。洪水保险是一种转移风险的方式,

^{*} 收稿日期: 2017-01-08 修回日期: 2017-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(51379137; 51579162); 水利部基于防洪风险图的避洪转移方法研究(14H0392); (中央本级)山洪灾害防治项目建设与管理技术支持服务项目(SHZH-IWHR-79)

第一作者简介: 张小霞(1990-), 女, 重庆人, 博士研究生, 主要从事水力学及河流动力学方面的研究。

E-mail: zhang-xiaoxia@stu.scu.edu.cn

通讯作者: 张新华(1965-), 男, 四川资中人, 教授, 研究方向水力学及河流动力学、水环境. E-mail: xhzhang@scu.edu.cn

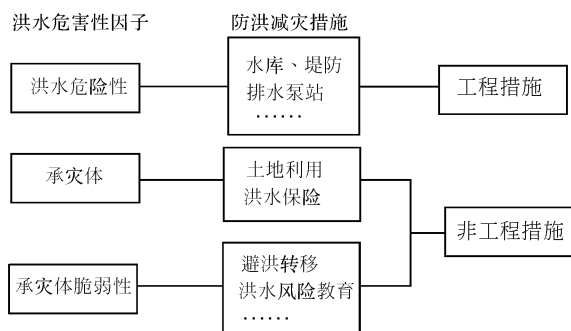


图1 洪水危害性因子及应对措施

并未从实质上减少总的损失,而是改变了损失分担方式。防洪立法、土地利用管理都是从政策法规的角度出发,控制洪泛区土地开发建设,都是预防机制。洪水风险教育、洪水预警预报、避洪转移则是从提高应对洪灾的主观能动性出发达到减轻洪灾损失效果。

工程措施针对在工程设计标准以内的洪水有着极大的减灾效果,但工程标准总是有限的,超标准大规模洪灾(如1993年密西西比河)累次发生让人们认识到工程措施并非万能^[6],只有将工程措施与非工程措施结合起来共同应对洪水灾害,才能最大限度地发挥减灾作用。尽管防洪工程、法规、洪水保险等各项措施都在不断完善并发挥作用,但大规模洪水的袭击并未消失,其他非工程措施也不能有效或最大限度的避免洪灾损失,因此,避洪转移在应对实际洪灾时有着不可代替减灾作用。

以我国山洪灾害防治试点研究为例,2009年开始建设山洪灾害防治非工程措施试点县103个,其中有61个县发生山洪灾害329次,通过系统监测,及时预警,提前紧急转移受威胁群众93万人,避免了4.4万余人伤亡^[7]。我国山洪灾害试点县均为山洪灾害频发区域,防治前累计发生灾害3132次,死亡9642人,直接经济损失约900亿元。据估算,试点区域经治理后山洪灾害发生频率高于历史平均水平,也仅有13人死亡、失踪(都是转移后私自返回造成的),较历史统计年均死亡160人大大减少。由此可见避洪转移在紧急应对洪灾、减少人员伤亡方面发挥着重要作用。

2 基于洪水风险图的避洪转移分析方法

2.1 洪水风险图

洪水风险图融合了地理、社会经济、洪水特征等基本信息,通过资料调查、洪水计算和成果整理,以地图形式直观反映某一地区发生洪水后可能淹没的范围、水深及其空间分布等,用以预

示和分析不同量级洪水可能造成的风险和危害。洪水风险图按防洪区域不同可分为蓄滞洪区洪水风险图、防洪保护区风险图、城市洪水风险图、水库洪水风险图、洪泛区风险图等五种类型。

洪水风险图是各级防汛指挥部门开展防汛调度、抢险救灾等工作的重要决策依据,指导洪水威胁地区和洪泛区的建设,在发生洪灾紧急情况下为群众避洪(疏散)路线的选择提供基本参考,为灾情评估提供基础依据等等。世界各国的防汛形势和国情不同,洪水风险图的绘制目的、绘制内容和表达形式也有显著差异,美国为了实施洪水保险计划^[8],联邦救灾总署组织绘制并由联邦政府颁布洪水危险区界限图和洪水保险率图。欧洲为应对多国共同洪水风险制作了100 m精度的全欧洲洪水风险图^[9]。日本国土交通省绘制的“泛滥区洪水防御图”不仅包含洪水淹没信息,还标注有区域地质危险区、消防机构、水文观测站以及避难所等信息,日本的洪水风险图信息全面,以警示洪泛区居民洪水危险性并做好应急准备^[10]。

根据我国国情和洪水分布,国家防汛抗旱部门将洪水分为四个等级。一般洪水:洪峰流量或洪量的重现期为5~10年一遇的洪水。较大洪水:洪峰流量或洪量的重现期为10~20年一遇的洪水。大洪水:洪峰流量或洪量的重现期为20~50年一遇的洪水。特大洪水:洪峰流量或洪量的重现期大于50年一遇的洪水。并根据洪水等级绘制5年、10年、20年、50年、100年、200年、和500年、1000年一遇等几组洪水风险图。目前,七大流域机构已经完成了历史洪水风险图的制作^[11],大部分省市也完成了重点城市和大中型水库洪水风险图的编绘工作。

当前,我国洪水风险图编制已取得了很大进展,但图中洪灾避难、应急物资调度等信息还不够完善;应对实际洪水时,如何应用洪水风险图指导应急减灾也不明确。

2.2 分析思路

为了更好的发挥洪水风险图的减灾作用,首先利用洪泛区洪水风险图,分析出对应洪水等级发生时应如何进行避洪转移,再将相应等级的洪水风险图及其避洪转移分析成果与实际洪水联系起来,达到应用洪水风险图指导避洪转移,减轻洪灾损失的目的,分析思路如图2所示。即首先确定特定洪水风险图的可行转移方案:明确需要转移的区域及其对应的适宜转移方法;安置点如何分配;转移路径如何选择等问题。然后根据实际洪水预测数据,判别出可能发生洪水的频次,并选择对应的洪水风险图及其避洪转移分析成果指导防洪减灾工作。

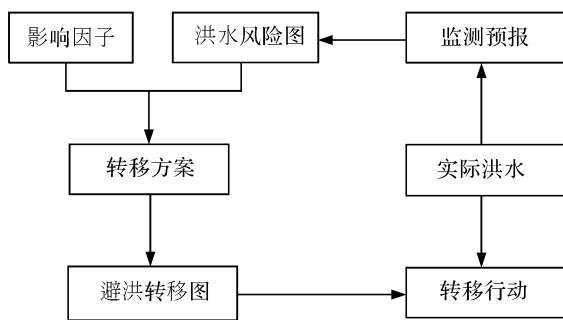


图2 避洪转移分析思路

2.3 基于洪水风险图的避洪转移分析方法

针对已有的洪水风险图，对整个洪泛区进行宏观分析：确定转移需求；选取避洪转移方法；分配安置点并选择最优路径，还可根据分析成果制作避洪转移图。为实现基于洪水风险图的避洪转移分析方法，首先需要从洪水风险图中提取用于分析的基本要素；然后对洪泛区进行转移需求分析；然后进行安置点分析；再根据需求分析和安置点分析结果，对洪泛区进行安置点分配及最优路径优选；最后还需对分析结果进行合理性分析，考查其可行性，并制定相应的避洪转移方案。

2.3.1 分析要素提取

我国洪水风险图一般包含淹没范围及水深分布，建筑设施、道路等基本信息。为了转移安置，还需要知道安置地点及安置点的容量。即：洪水淹没及分布、建筑设施、道路和安置点这四个基本分析要素。另外还可获取防洪设施、防洪物资储备、地质灾害多发点等方便分析和指导避洪的其他信息。

2.3.2 转移需求分析

依据洪水风险图的淹没情况（包括淹没范围、淹没水深分布、洪水到达时间、研究区域建筑结构等），将洪泛区划为多个不同危险程度的区域，不同危险度区域可采用相应的转移方法（水平转移、垂直转移和原地避洪）。其中危险度较高的区域需要水平避洪转移，需水平转移的区域又可结合行政区划分为多个转移行动小组。

(1) 洪泛区危险度分区

洪水发生时，处于室外的人、车辆等危险度高，但是其数量及分布是不确定的，不便于定量分析，而洪水影响区域内的建筑物则是相对固定的，可以定性及定量研究。假定洪水来袭时，居民能及时回到就近建筑物中避难，则可以用建筑物的抗洪能力（即该建筑能承受的最大量级的洪水淹没深度、流速及淹没历时）作为承灾体（包括建筑物本身及其内的人员和财产）的安全性。通过比较洪水淹没深度、流速及淹没历时与建筑物的抗

洪能力大小来划分洪泛区的危险度。

参考美国联邦应急管理部居民洪水撤退过程指南^[12]以及Xia J等人^[13]的文献研究，选取0.3m作为洪水危险性大小的一个分界点。HubbaRd S^[14]的调查研究，偏安全的选取建筑物高于6倍水深时，建筑物可以满足区域避洪转移要求。

分别以 h 、 v 、 t 代表淹没水深、流速及淹没历时，以 H 、 Q 、 P 代表承灾体（建筑物）的高度、耐冲刷及耐浸泡性，则承灾体的安全可靠性及对应的转移方法如表1所示。

表1 转移方法选取

承灾体及淹没情况				安全性	转移方法
$h \leq 0.3m$	-	$Q > v$	$P > t$	高	原地避洪
$h > 0.3m$	$H \geq 6h$	$Q > v$	$P > t$	中	垂直转移
$h > 0.3m$	$H < 6h$	-	-	低	水平转移
-	-	$Q < v$	-	低	水平转移
-	-	-	$P < t$	低	水平转移

(2) 转移行动分组

对于需要水平转移的区域，为方便组织转移，可按照自然地域分布及行政区划进行分组，例如：可根据街道、社区、村组等划分。这样可以方便确定每个小组的人数及各分组合分布的情况，对于人数过多或分布太散的应根据情况考虑再次细分，以方便转移的组织管理及统一行动。

2.3.3 安置点分析

安置点的位置及信息在避洪转移分析及实践中不可或缺，但目前我国已有的洪水风险图上安置点信息较为缺乏，因此需要将研究区域周边适宜的场所（如学校、广场、公共图书馆、公园等）作为避洪转移的候选安置点，再对这些安置点进行分析，重点包括需求量分析、合理性分析及容量分析。安置点分析的最终目标是：找出满足避洪转移安置点条件的避难场所，并保证这些安置点的位置安全合理且总容量满足区域设计洪水发生时的转移需求。

(1) 安置点需求量分析

安置点需求量分析以转移需求量为基础，参考Whitehead^[15]，Willigen M V^[16]等人的研究成果，可根据区域人口统计数据、区域经济状况及人口组成，分析统计不同人群选择公共避难所的概率。

(2) 安置点合理性分析

安置点合理性分析包括位置合理及分布合理。Kar B等^[17]应用GIS判别适合应急避难的安置点位置，FLORIDA制定了全州应急避难所^[18]计划，Kongsomsaksakul S^[19]等人针对洪灾避难安置，建立了安置点定位模型，筛选适宜安置点位置以及评价安置点优劣的方法。基于以上研究成果，应该优先选用靠近主要交通要道及医疗中心、水源

等资源丰富并且地势开阔地质条件好的容量较大的安置点;排除交通不便、距居民区过远、地质条件较差以及地势低洼区域的安置点。此外安置点整体分布是否合理也要考虑,若某地区的安置点集中在一个小范围内,而其他大片区域上都没有安置点,显然是不合理,在实际转移中将会导致诸多问题:一些转移小组转移路线太长,多个小组经过同一路段导致严重的交通拥堵等。因此,安置点最好均匀分散在洪水影响区的周围并与转移需求相适应。

(3) 安置点容量分析

安置点容量大小的确定从三点入手:①参照安置点日常功能容量估算,如一个学校能容纳 n 名师生学习生活,通常来说学校的操场、教室、食堂都能容纳这么多人,也就是说其最大限度容量约为 $3n$;②按照安置点有效面积及人均最少占地面积估算,即占地面积减去不可利用面积(如树林、池塘等),若为多层结构建筑则建筑有效面积等于单层有效面积乘以楼层数;③安置点生态可持续发展,应当保证灾民进入后,安置区能在保证灾民资源使用量的同时,不发生严重生态恶化,保持其原有功用正常运转。

3.3.4 安置点分配及最优路径分析

避洪转移分析中的安置点分配是多对多的分配问题,其中路径的长短或单位时耗可作为其运输成本,这样就可以将安置点分配及最优路径选择用运筹学中的不平衡运输问题概括。使用 GIS 网络分析功能建立转移需求点和安置点间一一对应的最短路径成本矩阵,考虑转移小组人数及安置点容量,根据路径优选理论(静态路径分析方法或动态路径分析方法,根据需要选用),运用运筹学运输问题^[20]基本原理求解成本矩阵,求解结果即为转移成本最少的分配方案。

表 2 转移小组到安置点的成本矩阵

$E \setminus S$	$S(1)$	$S(2)$	\cdots	$S(m)$	Re
$e(1)$	$L(1, 1)$	$L(2, 1)$	\cdots	$L(1, m)$	$Re(1)$
$e(2)$	$L(2, 1)$	$L(2, 2)$	\cdots	$L(2, m)$	$Re(2)$
\cdots	\cdots	\cdots	\cdots	\cdots	\cdots
$e(n)$	$L(n, 1)$	$L(n, 2)$	\cdots	$L(n, m)$	$Re(n)$
RS	$RS(1)$	$RS(2)$	\cdots	$RS(m)$	

根据上述方法建立转移小组与安置点的成本矩阵,如表 2 所示。其中 E 表示转移分组的集合, E 中的每一个元素 $e(i)$ 代表第 i 个转移小组, $Re(i)$ 表示转移小组 i 的人数;安置点的集合用 S 表示, S 中的每一个元素 $S(j)$ 表示安置点 j , $RS(j)$ 表示安置点 j 的容量。 $e(i)$ 到 $S(j)$ 的单位成本用 $L(i, j)$ 表示。

2.3.5 结果分析与方案确定

(1) 结果分析

对安置点及路径选取结果进行合理性分析,包括以下三点。

①安置点分配合理性:如一些安置点接纳转移人数很多,但其附近还有其它未使用的安置点,则应根据需要进行调整。

②转移路径是否合理:多个小组途径同一路段应考查道路容量能否满足,容量不足时可将某一条或几条路径以次佳路径代替;存在个别转移小组转移路径过长时,可能需要拆分转移小组或者需要在该小组附近设置安置点。

③转移时间可行性:比较预测转移可用时间与转移方案完成必需时间的关系。若可用时间大于转移方案完成所必需的时间,则转移方案时间上可行,否则,需要改进或者救援。

(2) 避洪转移方案

根据分析结果,编制避洪转移预案,也可制作避洪转移图用于指导转移行动。

3 案例研究

以沂河左岸朱家庙 50 年一遇提防溃决洪水淹没水深分布图^[21](下文简称为洪水风险图,具体详图请参见洪水风险图编制导则(SL 483-2010)附图 3)开展案例分析。该洪水风险图中包含洪水淹没区水深分布、主要撤退道路、村镇等主要信息,并附有不同频率洪水发生时,朱家庙溃口洪水淹没区社会经济指标表以及朱家庙 50 年一遇设计洪水过程线图和 200 m 溃口进洪流量过程曲线。其中水深分布信息完善,但缺乏安置点信息以及不同地点洪水到达时间,需要结合区域土地开发利用情况进行安置点分析及路径优选。

3.1 洪水风险图及分析要素提取

利用 GIS 将洪水风险图中的洪水淹没信息、道路和已标出村镇位置提取出来。并通过 Google earth 获取地区行政区划及居民分布情况。

3.2 转移需求分析

在设计洪水作用下,沂河朱家庙溃决将影响到山东临沂河东区梅埠镇和芝麻墩两个镇,43 个行政村,受影响人口总数为 41 799 人,将居民分布情况和水深分布叠合分析,根据山东省临沂市六次全国人口普查数据^[22],需水平转移的有 34 个村,总人数为 27 382 人。转移人数较少或者位于洪水淹没区边缘地带的村采用村内互助或者邻村互助形式进行避洪安置,钟贺城村、醋庄前村、湾里村、干沟渊村、李家石河村、兰宅子村、建设村这 7 个村可如此转移,其余 27 个需水平转移村,总的需转移人数为 25 466 人,为便于分析及

表 3 水平转移村编号及需转移人数

编号	村	人数	编号	村	人数	编号	村	人数	编号	村	人数
1	彭古庄	855	8	八间屋	124	15	彭家道口	807	22	庄家墩村	142
2	南庄子村	522	9	韩家埠村	2579	16	后道口	332	23	谢家湖村	902
3	黄贺城村	1567	10	禹王城村	1472	17	白家道口	902	24	新宅子	190
4	王贺城村	493	11	钟家埠村	1187	18	朱家庙村	1243	25	杨家湖村	262
5	张贺回族	314	12	王家埠村	1282	19	王家店村	1234	26	白家墩村	617
6	小墩村	1290	13	梅埠	4180	20	姜家墩村	902	27	小庄子	475
7	大墩村	760	14	前道口	474	21	刘家村	489			

标识，将需要水平转移的村进行编号，如表 3 所示，表 3 中人数表示该村需要水平转移的人数，各村均大于 100 人，可按村划分转移小组，居民人数较多的村，转移时可拆分到多个安置点。

3.3 安置点分析

(1)安置点需求量分析

根据第六次全国人口普查数据知临沂市人口年平均增长率约为 0.10%，考虑未来 10 年人口增长，粗略估测发生设计洪水时转移需求量将可能达到 27 657 人。

(2)候选安置点及其合理性分析和容量分析

根据前述安置点合理性分析原则，考虑潜在安置点是否位于淹没区及其淹没情况、是否处于地质不良区，建筑物层数、高度、安全可靠度，周边交通道路等情况与条件。可概括为安全性和交通条件两个方面。研究区域(地处沂河河东区)为平原地带，泥石流、滑坡等地质灾害发生可能性较小，在安置点结构稳定的假定条件下，安全度可根据受洪水影响情况分为 5 级：非淹没区的安置点安全度为 5，淹没水深小于 0.3 m 的安置点安全度为 4，水深在 0.3 ~ 0.5 m 之间时为 3，在 0.5 ~ 1.5 m 之间时为 2，在 1.5 m 以上时为 1，安全度越大越好。以安置点周围 500 m 内是否有交通要道作为交通条件好坏的分界点，如有则交通条件

好，否则交通条件差。由此可将安置点用作避洪安置用的合理性分为适宜、一般及不适宜三类如表 4 所示。

表 4 安置点适宜性

交通 条件	安全性				
	5	4	3	2	1
好	适宜	一般	不适宜	不适宜	不适宜
差	一般	不适宜	不适宜	不适宜	不适宜

以洪水风险图区域附近学校、医院、社区服务站、公园、广场、政府等场所作为候选安置点，考察分析了洪水影响区域周边 45 个公共场所作为潜在避洪转移安置点。安置点的容量根据其占地面积及其功能推求。分析得到适宜的安置点有 30 个，总容量 32 000 人，分布如图 3 中蓝色圆点所示，图 3 中以安置点的编号表示对应的安置点，各安置点容量如表 5 所列。

3.4 安置点分配及最优路径分析

分别以就近道路上的一点表示行政村和安置点，应用 GIS 对转移点、安置点及道路进行拓扑分析，使得道路互相连通，保证点位于路线之上。采用路径长度作为转移成本，应用 GIS 网络分析功能获取转移村到安置点的一一对应的成本矩。

表 5 研究区域适宜安置点编号及容量

编号	安置点	容量	编号	安置点	容量	编号	安置点	容量
1	临沭县南古镇栗行完小	1000	11	东城小学	1000	21	皇山公园	2000
2	临沂陈湖小学	800	12	兰墩完小	1000	22	临沂滨河游乐园	2000
3	梅埠镇小	1500	13	九天国际飞行学院	500	23	河东区人民医院	500
4	临沂佳和小学	800	14	临沂沭埠岭小学	1000	24	临沂市人民医院	500
5	临沂李公河小学	800	15	东方双语实验小学	1200	25	后杨墩小学	1000
6	芝麻墩街道大岗联小	1200	16	军星学校	500	26	临沂开发区第三实验小学	1500
7	临沂开发区第一实验小学	2000	17	南昌航空大学函授站	300	27	重沟医院	500
8	临沂外国语学校	1200	18	临沂机场职工俱乐部	200	28	河东区重沟镇初级中学	2500
9	临沂第一中学南校区	2500	19	青岛民航服务学校	200	29	朝阳街道卫生院	300
10	临沂第三十一中学	2500	20	青岛九天飞行学院	500	30	临沂开发区第三医院	500

表6 水平转移村与安置点对应分配情况

村	安置点	人数	村	安置点	人数	村	安置点	人数	村	安置点	安置人数
1	11	855	9	21	2579	15	8	807	23	2	902
2	28	522	10	26	1472	16	7	332	24	3	190
3	22	1567	11	8	1187	17	9	902	25	3	262
4	27	493	12	12	1282	18	7	1243	26	28	617
5	26	314	13	3	1048	19	9	1234	27	28	475
6	1	1290	13	4	800	20	6	902			
7	28	760	13	10	2332	21	5	489			
8	1	124	14	6	474	22	5	142			

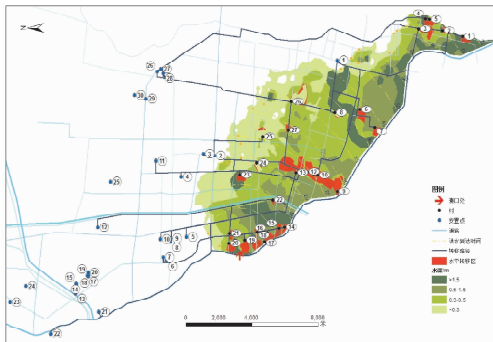


图3 沂河朱家庙50年一遇洪水溃堤转移划分及路径图

考虑到组织管理效率及转移指挥方便,对需要拆分的转移点,控制其最少拆分后小组人数不少于100人,采用运筹学运输问题求解得到总路径最短安置点分配方案,如表6所示,表中分别以相应的编号表示村和安置点,人数表示对应编号的村到安置点的转移人数。

3.5 结果分析与方案制定

(1) 安置点及路径长度

由图3可以看出在西北区域安置点较多,但东面安置点较为缺乏,导致东南区域转移小组1~5转移路径很长,都大于10 km,同样转移小组7、9~12也存在转移路径较长,分析图中非淹没区域,可知在图3中东面红色虚线标出的1区、2区可适当增加一些安置点,用以安置转移路径长度大于10 km的转移小组,其中1区安置点容量不少于4 511人,用于安置转移小组1、2、3、4、5及7;2区安置点总容量不少于6 520人,用于安置转移小组9、10、11、12。在紧急避洪中也可在1区、2区设置移动式安置点,如搭设帐篷。

(2) 转移时间可行性

① 转移必需时间分析

根据路径分析结果及各村需转移人数推求各村转移撤退最少耗时。假定汽车载客50人/车,行驶速度为60 km/h,车距100 m。在交通工具足够,转移过程中不考虑其它阻碍事件发生时,计算出

各村完成全员转移运输任务的必需时间列于表7中第三列。

② 转移可用时间分析

根据洪水风险图中给出的设计洪水溃口进洪流量过程线 and 设计洪水过程线,以河流流量达到 $7\,200\text{ m}^3/\text{s}$ 为洪水警戒指标,将该时刻作为计时零点,即 $t=0$ 时刻。根据避洪转移时间表^[23]相关理论,制作沂河洪水风险图对应的避洪转移时间表如图4所示,图中包括转移关键时间节点和时间段。根据设计洪水过程线,河道流量先增加后减小,在 $t=4\text{ h}$,流量达到 $124\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,河堤溃决,200 m溃口进洪流量为 $1\,200\text{ m}^3/\text{s}$,假设溃决水深为1 m,则洪水流速将达到6 m/s,溃堤洪水在行进过程中断面迅速扩大,流速将减小,可大致推求出洪水前端行进曲线,如图3中黄色虚线所示,时间单位为min,由此可以判断出洪水到达各村所在地的时间。

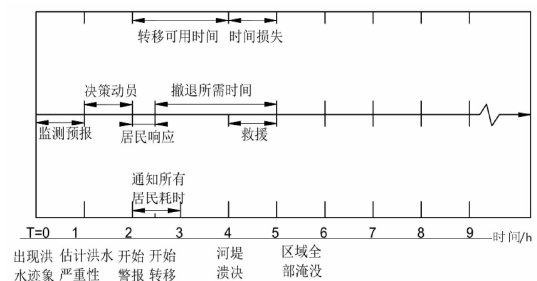


图4 避洪转移时间表

考虑转移路径最早被洪水淹没的时间,各村的转移可用时间从下达转移决定开始(也就是开始警报的时刻)到洪水最早到达该村位置及转移路线的时刻为止。开始警报的时刻定在出现洪水迹象后120 min,加上洪水行进耗时得到各村实际转移可用时间如表7中第4列。用表7中转移可用时间减去转移必需时间得到每个小组的允许通知加延误总时间,列于第5列,最少允许延误时间为88 min,时间比较充分,分析成果时间上合理可行。

表 7 沂河避洪转移路径合理性分析

编号	L/km	转移必需 时间/min	洪水到达 历时/min	允许延误 时间/min	编号	L/km	转移必需 时间/min	洪水到达 历时/min	允许延误 时间/min
1-11	24.5	26	135	109	14-6	7.3	8	120	112
2-28	17.5	18	180	162	15-8	7.4	9	120	111
3-22	29.2	32	120	88	16-7	6.0	7	120	113
4-27	16.5	17	185	168	17-9	7.6	9	120	111
5-26	16.9	17	185	168	18-7	6.8	9	120	111
6-1	3.8	6	160	154	19-9	5.6	8	120	112
7-28	14.7	16	150	134	20-6	4.6	6	120	114
8-1	3.0	3	155	152	21-5	3.8	5	125	120
9-21	16.2	21	120	99	22-5	6.1	6	125	119
10-26	13.1	16	140	124	23-2	2.5	4	135	131
11-8	10.6	13	125	112	24-3	3.3	4	135	131
12-12	13.5	16	130	114	25-3	4.3	5	140	135
13-3	4.8	7	140	133	26-28	7.3	8	150	142
13-4	6.8	8	135	127	27-28	8.5	9	145	136
13-10	9.6	14	125	111					

注：表中以村和安置点的编号组合表示村到对应的安置点

(3)转移方案及应急处置

沂河左岸朱家庙 50 年一遇溃决洪水淹没水深分布图受洪水影响人数 41 799 人，涉及行政村 43 个，经分析其中需求水平转移的有 34 个村，在 34 个需要水平转移的村中 7 个村(共 1 816 人)以本村或邻村互助形式安置、27 个村(共 25 466 人)安置到公共避难安置点，其余村(共 14 417 人)可采取原地避洪。

对研究区域周边学校、医院等 45 个公共场所作候选安置点分析，经过候选安置点合理性分析和容量分析，最终结果表明所有候选安置点中不适宜的安置点有 10 个，适宜性一般的安置点 5 个，适宜的安置点有 30 个，适宜安置点总容量 34 600 人，可满足区域设计洪水避洪要求。

对 27 个需要公共安置点的村安置点分配和路径分析，如图 3 所示。图 3 中绿色区域为洪水淹没区域，洪水影响区域及周边行政村以黑色圆点表示，根据受洪水影响区域采取的转移方法不同分为三个区域，其中水平转移并使用公共安置点的区域(如图中红色多边形)，各村分配的安置点如图 3 所示，相应的村到安置点的转移路径如图中蓝色折线。经过方案分析，认为转移小组 1、2、3、4、5、7、9、10、11、12 这十个小组的转移路径过长，建议就近新增安置场所，位置分别设在图 3 中红色椭圆 1 区及 2 区。

5 结语

本文提出的避洪转移分析方法是一种较为普遍适用的分析方法，以洪水风险图为基本分析资料，在洪水淹没范围、淹没水深、洪水历时曲线等已有数据情况下，结合洪泛区现有土地利用情况，通过逐步分析，获取洪泛区转移需求、安置点选取、安置点分配以及转移路径选取。这些都有助于更好的发挥前期洪水风险图编制成果，提高洪灾应急响应能动性。

参照各国洪水风险图，分析应用洪水风险图指导避洪转移的必要条件，发现当前我国洪水风险图中安置点等一些关键要素缺乏，对此提出了安置点适宜性分析原则及安置容量定量指标。区域安置点分析成果可指导地区合理规划，比如确定拟建公共场所的位置及规模等。

沂河左岸朱家庙溃堤洪水风险图的具体应用，验证了本文避洪转移分析方法能够解决我国人口数量大、密度高、分布广的客观情况下较大规模洪灾发生时整体应急转移分析，结果表明：本研究提出的基于防洪风险图的避洪转移分析方法合理和可行。分析结果可反馈区域安置点分布合理性，并为区域规划及进一步加强洪水应急能力提供参考及建议。研究可为洪泛区的避洪转移、应

急预案编制和抗洪抢险中实时避洪转移的实施提供一定指导和借鉴。

参考文献:

- [1] 李发文, 张行南, 冯平. 洪水灾害避难系统研究[J]. 灌溉排水学报, 2005, 24(6): 64-67.
- [2] 魏华林, 洪文婷. 巨灾风险管理的困境与出路——兼论中美洪水灾害风险管理差异[J]. 保险研究, 2011(8): 3-12.
- [3] 李宏. 自然灾害与经济增长关系的实证研究——基于 14 国 1970 年-2008 年面板数据分析[J]. 价格月刊, 2011(1): 47-51.
- [4] 阎俊爱, 钟登华, 李永林. 城市防洪减灾非工程措施的研究与展望[J]. 水利水电技术, 2003, 34(1): 66-69.
- [5] John W Porter, 梁志勇. 洪水风险管理新方法在中国的应用[J]. 中国防汛抗旱, 2010, 20(3): 60-63.
- [6] 姜付仁, 向立云, 刘树坤. 美国防洪政策演变[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(3): 38-45.
- [7] 孙加龙. 省级山洪灾害预警监测系统的开发[J]. 中国防汛抗旱, 2012, 22(1): 34-36.
- [8] 夏益国. 美国洪水保险计划的运行及特征研究[J]. 上海保险, 2007(4): 60-63.
- [9] Alfieri I, Salamon P, Bianchi A, et al. Advances in pan-European flood hazard mapping[J]. Hydrological Processes, 2014, 28(13): 4067-4077.
- [10] Shidawara M. Flood hazard map distribution[J]. Urban Water, 1999, 1(2): 125-129.
- [11] 郑晓阳. 基于 SDSS 的感潮河口城市水灾减灾辅助决策研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2005.
- [12] Department of Homeland Security of USA. Floods [EB/OL]. [2014-03-05]. <http://www.fema.gov/floods>.
- [13] Xia J, Falconer R A, Lin B, et al. Numerical assessment of flood hazard risk to people and vehicles in flash floods[J]. Environmental Modelling & software, 2011, 26(8): 987-998.
- [14] Hubbard S, Stewart K, Fan J. Modeling spatiotemporal patterns of building vulnerability and content evacuations before a riverine flood disaster[J]. Applied Geography, 2014, 52(52): 172-181.
- [15] Whitehead J C, Edwards B, Willigen M V, et al. Heading for higher ground: factors affecting real and hypothetical hurricane evacuation behavior[J]. Environmental Hazards, 2000, 2(4): 133-142.
- [16] Willigen M V, Edwards T, Edwards B, et al. Riding Out the storm: Experiences of the physically disabled during Hurricanes Bonnie, Dennis, and Floyd[J]. Natural Hazards review, 2014, 3(3): 98-106.
- [17] Kar B, Hodgson M E. A GIS-based model to determine site suitability of emergency evacuation shelters[J]. Transactions in GIS, 2008, 12(2): 227-248.
- [18] 2004 statewide Emergency shelter Plan. STATE OF FLORIDA, Department of Community Affairs Division of Emergency Management.
- [19] Kongsomsaksakul S, Yang C, Chen A. shelter location-allocation model for flood evacuation planning[J]. Journal of the Eastern Asia society for Transportation studies, 2005, 6: 4237-4252.
- [20] 夏少刚, 张建华. 求解运输问题的一种新算法[J]. 运筹与管理, 2007, 16(1): 32-36.
- [21] 中华人民共和国水利部. SL 483-2010 洪水风险图编制导则[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [22] 山东省临沂市第六次全国人口普查领导小组办公室. 临沂市 2010 年人口普查资料[R]. 临沂: 临沂市统计局, 2012.
- [23] Esm S O, Oam P C, Davies B. Timeline modelling of flood evacuation operations[J]. Procedia Engineering, 2010, 3: 175-187.

Flood Evacuation Analysis Study Based on Flood Risk Map

ZHANG Xiaoxia¹, SHI Wenjing², SHEN Fuxin² and ZHANG Xinhua¹

(1. State Key laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Chengdu 610065, China;

2. The Ministry of Water Conservancy and Hydropower Planning and Design Institute, Beijing 100011, China)

Abstract: Flood disaster is one of the most serious natural disasters in China, the losses caused by flood increase with the economic development and urbanization. Evacuation, as a non-engineering measure, has been proved to be an effective way to reduce the damages caused by flooding in many cases. In order to have flood hazard map to play an active role and also to find out the difficulties in its usage, an analysis method of flood evacuation with a reference of Flood Hazard Mapping Guide (SL 483-2010), was proposed based on the flood hazard map and the environment of the inundation area. The method proposed consists of the analyzing on the: 1) evacuation needs; 2) available shelter (including shelter suitability and capacity, as well as shelter demands) and 3) the locations of shelters and the optimization of evacuation routes. To verify the rationality and feasibility of the proposed method, a case study was carried out according to the Zhu Jia Miao hazard-map which resulted by the dike break at the left bank of Yi river when a 50 year round flood happen. Results of the study testified the proposed method and it can provide a certain guidance and reference for the flood evacuation and emergency planning, as well as the implementation of evacuation during a real time flooding process, further more this paper has give a actual direct of fulfilling the flood hazard map and regional planning.

Key words: flood hazard map; flood evacuation; evacuation needs; emergency resettlement; multi-route optimization