

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdcq.2019.0134

王复生,李传奇,张焱炜,等.基于GIS的南水北调东线山东段区域洪灾风险区划[J].南水北调与水利科技,2019,17(6):45-53. WANG F S, LI C Q, ZHANG Y W, et al. Regional flood disaster risk zoning in Shandong reach of eastern route of South-to-North Water Transfer Project based on GIS[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019,17(6):45-53. (in Chinese)

基于GIS的南水北调东线山东段区域洪灾风险区划

王复生,李传奇,张焱炜,李继政

(山东大学 土建与水利学院,济南 250061)

摘要:针对南水北调东线山东段区域的防汛需求,主要从洪水灾害的危险性、敏感性和易损性3方面建立洪水灾害风险区划模型,综合考虑研究区域的汛期暴雨日数、暴雨强度、高程、高程标准差、河网密度、湖区缓冲区、GDP、人口密度、土地利用类型等9项影响指标,用蒙特卡罗法辅助层次分析法分析确定指标权重值,通过ArcGIS的地图代数功能对各个指标图层归一化处理,计算得到研究区域的洪水灾害风险区划图。区划结果显示:鲁南片的高风险区位于南四湖周边区域、枣庄市局部地区;鲁北片的高风险区位于聊城城区、黄河以北沿线;胶东片的高风险区位于济南市周边以及半岛东部局部地区。通过与历史洪涝灾情资料进行比对,发现上述区划结果符合灾害发生的实际情况,区划结果对南水北调东线山东段洪水防治和决策管理具有重要的参考价值。

关键词:南水北调东线工程;风险区划;GIS技术;蒙特卡罗法;层次分析法

中图分类号:TV91 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Regional flood disaster risk zoning in Shandong reach of eastern route of South-to-North Water Transfer Project based on GIS

WANG Fusheng, LI Chuanqi, ZHANG Yanwei, LI Jizheng

(School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: In view of the flood control demand of the east route of South-to-North Water Diversion Project in Shandong area, the flood risk zoning model was established based on the fundamental principles of hazard, sensitivity and vulnerability of flood disasters. Nine influencing indices such as rainstorm days in the flood season, rainstorm intensity, elevation, standard deviation of elevation, river network density, and buffer zone of lakes, gross domestic product, population density, and land use type were comprehensively considered. The weights of indices were determined by means of the analytic hierarchy process (AHP) with the auxiliary of Monte Carlo method. The cartographic algebra function in ArcGIS was adopted to perform the normalization processing of the various indicator layers. After calculating and mapping process, the risk zoning map of flood disasters of the study area was obtained. The results showed that the high-risk areas of south, north and east Shandong were located in the surrounding regions of Nansi Lake and some local areas in Zaozhuang City, Liaocheng City and the north side of the Yellow River, the vicinity of Jinan City and part of regions of the east peninsula. Compared with the historical data of flood disasters, the above zoning results proved to accord with the actual situation of the study area, which showed that the results have important referencing values for flood prevention and decision management in Shandong section of the east route of South-to-North Water Transfer Project.

Key words: east route of South-to-North Water Transfer Project; risk zoning; GIS technique; Monte Carlo method; analytic

收稿日期:2019-01-20 修回日期:2019-05-20 网络出版时间:2019-06-26

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190625.1137.012.html>

基金项目:国家科技支撑计划课题(2015BAB07B00);山东省自然科学基金(ZR2017MEE006)

作者简介:王复生(1997—),男,安徽六安人,主要从事城市防洪减灾研究。E-mail:201734684@mail.sdu.edu.cn

通信作者:李传奇(1963—),男,河南沈丘人,教授,博士生导师,主要从事城市雨洪模拟及预报研究。E-mail:lichuanqi@sdu.edu.cn

hierarchy process

洪水灾害是世界上最常发生的自然灾害之一,近年来越来越频繁发生。南水北调东线山东段工程属暖温带亚湿润气候区,受季风气候的影响,降雨多以暴雨的形式出现,汛期降雨量占全年的 60%~80%,极易引发洪水灾害^[1]。工程的供水范围包括黄淮海冲积平原东部和胶东地区,地势较平坦,是我国人口集中、经济文化较发达的地区,一旦发生洪水,将会影响工程运行安全,导致供水中断,对供水区域社会、经济的稳定发展造成严重威胁。因此对南水北调东线山东段区域展开洪灾风险区划研究十分有必要。

洪水灾害风险区划是防洪的重要工具,在洪水风险管理和防洪减灾方面具有重要的实际应用价值^[2]。洪水灾害风险区划对洪水灾害的自然属性和社会属性进行综合评价,旨在提高洪水风险评估的准确性^[3]。将层次分析法(AHP)^[4]与 GIS 平台相结合是一种常见的多准则风险评估方法^[5],可以将复杂决策问题层次化分析,定性、半量化地确定风险的空间变异性^[6],在洪水灾害风险区划研究上得到广泛应用^[7-9]。然而层次分析法受到决策者的主观认知限制,具有一定的不确定性,往往会使权重计算出现偏差,对结果产生重大影响^[10]。对此,兰继斌等^[11]利用基于模糊一致矩阵的模糊层次分析法提高权重计算的合理性。Gigovic L 等^[12]在洪水灾害制图中引用粗糙区间数改进传统的层次分析法,客观考虑了不确定性影响。徐镇凯等^[13]将层次分析与灰色聚类法相结合,对洪灾风险进行定量评价与

分析。本文引入蒙特卡罗辅助层次分析法(MC-AHP)来降低不确定性,这种方法已经在滑坡敏感性绘图、土壤侵蚀危害等方向得到了应用^[14]。该方法将指标重要性判断矩阵中的非对角元素视为具有不确定性的随机变量,利用 beta-PERT 分布描述模型指标,结合蒙特卡罗法估计指标权重值。

本文综合考虑南水北调东线山东段区域的降雨、地形、水系、土地利用、经济和人口密度等指标,用蒙特卡罗法辅助层次分析法建立洪水灾害风险区划模型,使群体决策过程中出现的不确定性达到最小化,再赋予各个影响因子相应权重,并在 GIS 平台上进行归一化处理,得到南水北调东线山东段区域的洪水灾害风险区划空间分布情况,以期在南水北调工程的防洪减灾决策提供支持。

1 研究区域与方法

1.1 区域概况

南水北调东线工程在山东境内分为南北、东西两条输水干线,全长 1 191 km,南北干线长 487 km,东西干线长 704 km,其中半岛东部利用引黄济青工程供水。工程在山东省内形成“T”字型输水大动脉和现代水网大骨架,实现长江水、黄河水和当地水的联合调度、优化配置,为保障全省经济社会可持续发展提供水资源支撑。供水范围包括鲁南、鲁北和胶东半岛三大片,涉及济南、青岛、烟台、威海、潍坊、淄博、东营、滨州、聊城、德州、枣庄、济宁和菏泽共 13 个地市,61 个县(市、区)。研究区域的地理概况见图 1。



图 1 南水北调东线山东段区域概况

Fig. 1 General situation of Shandong reach of the East Route of the South-to-North Water Transfer Project

南水北调东线山东段区域多年平均降水量从南向北逐步递减,受季风气候影响,雨量集中,汛期降雨量占全年的 60%~80%,汛期暴雨是造成本区域洪水的最主要原因。山东段工程输水跨度较大,沿线交叉建筑物众多,在运行期间承担着输水、泄洪、航运等多重任务,部分渠段长期保持高水位运行,工程安全极易受到暴雨洪水的影响。

1.2 研究方法

1.2.1 数据标准化

由于影响洪水灾害风险的指标之间存在量级和量纲上的差异,为了使不同的数据层能够计算和比较,需要将数据标准化处理^[15]。本文采用极差标准化方法将栅格单元数据转换至[0,1]范围内的值。设研究区域有 m 个评价指标,有 n 个评价单元,则有原始评价矩阵

$$R=(x_{ij})_{m \times n} \quad (1)$$

用极差标准化方法进行如下换算:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i \{x_{ij}\}}{\max_i \{x_{ij}\} - \min_i \{x_{ij}\}} \quad (2)$$

$i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$

式中: x_{ij} 是第 i 个指标第 j 个单元对应的原始数据; $\max_i \{x_{ij}\}$ 和 $\min_i \{x_{ij}\}$ 分别是第 i 个指标下所有单元数据中的最大值和最小值; x'_{ij} 是标准化的单元数据。

1.2.2 蒙特卡罗辅助层次分析法

传统层次分析法虽然简单实用,但是受到专家主观经验认知的限制。通过蒙特卡罗模拟可以有效降低层次分析法的不确定性,提高洪水灾害风险指标权重计算的准确性。蒙特卡罗辅助层次分析法的基本步骤如下。

(1)根据洪水灾害的自然特征和研究区域的典型性构建一个递阶层次结构,将复杂问题归结为准则层、指标层相对于高层即目标层的权重次序的总排序问题^[16]。

(2)决策者依据经验意见对同一层次所列指标的重要性进行两两比较并评判,然后逐层构建指标重要性判断矩阵

$$P=[a_{ij}]_{n \times n} \quad (3)$$

式中: a_{ij} 表示第 i 个指标和第 j 个指标的重要性比例,因此有 $a_{ii}=1$ 且 $a_{ij}=1/a_{ji}$ 。

(3)用 beta-PERT 分布拟合来自不同决策者的指标重要性判断矩阵中的非对角元素值。beta-PERT 分布可以在已知变量的最小值、最大值和最可能值的情况下对其概率分布进行估计,并且能较好的拟合正态分布、对数正态分布等^[17]。首先计算 beta-PERT 分布中的平均值 μ ,计算公式为

$$\mu = \frac{a_{\min} + \lambda a_{\text{mode}} + a_{\max}}{\lambda + 2} \quad (4)$$

式中: a_{\min} 、 a_{\max} 、 a_{mode} 分别是变量 a_{ij} 的最小值、最大值和最可能值;比例参数用于缩放分布的高度,默认值为 4^[18]。

然后计算分布的形状参数

$$\nu = \frac{(\mu - a_{\min})(2a_{\text{mode}} - a_{\min} - a_{\max})}{(a_{\text{mode}} - \mu)(a_{\max} - a_{\min})} \quad (5)$$

$$\omega = \frac{\nu(a_{\max} - \mu)}{(\mu - a_{\min})} \quad (6)$$

已知最大值和最小值以及形状参数,就可以从 beta-PERT 分布中大量取样并生成矩阵元素,此过程可以通过 betarnd 函数实现。

$$a_{ij} = a_{\min} + \text{betarnd}(\nu, \omega) \times (a_{\max} - a_{\min}) \quad (7)$$

(4)指标的权重值 W_i 计算公式为

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}} \quad i, j=1, 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

式中: b_{ij} 为过渡矩阵

$$b_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (9)$$

(5)对判断矩阵进行一致性检验。一致性比率(CR)可以反映判断矩阵的一致性程度和决策质量, $CR < 0.1$ 表示矩阵满足一致性无需修正, $CR \geq 0.1$ 表示矩阵需要重新构造^[19]。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (10)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (11)$$

式中: λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征值;CI 为一致性指数;RI 为 n 阶矩阵一致性指标。

2 洪水灾害风险区划模型

洪水灾害风险区划模型由风险区划指标体系及其对应的指标权重值组成。

2.1 指标体系及选取

洪水灾害的形成受降雨、产流、汇流等多个过程的影响,具有自然因素和人类活动因素双重属性^[20]。本文采用成因分析方法建立洪水灾害风险区划指标体系,包括目标层、准则层和指标层 3 个层次。其中准则层从致灾因子危险性、孕灾因子敏感性和承灾因子易损性 3 个方面展开分析。下面从这 3 个方面阐述其对洪水灾害的影响,选择具有代表性且可以量化的影响因子作为风险区划指标。

(1)致灾因子危险性。大范围的连续暴雨或雨量集中的特大暴雨是形成洪涝灾害的重要因素。本

文综合暴雨连续性和高强度的特征,定义了汛期多年平均暴雨日数和暴雨强度两个危险性指标。暴雨日数为汛期(6—9 月)日降雨量≥50 mm 的天数的累积值;暴雨强度为暴雨量/暴雨日数。

(2)孕灾因子敏感性。洪水的汇流过程与研究区域的地貌地形、水系分布等因素都密切相关。地形越平缓的地区越容易发生洪水,因此本文采用高程和高程相对标准差两个指标,根据“绝对高程越低,高程相对标准差越小,洪水危险程度越高”的原则来衡量研究区域地形地貌对洪水灾害危险性的影响^[21]。南水北调东线山东段区域内包含沂沭泗水、黄河、小清河等诸多水系,还有南四湖、东平湖等蓄水系统,其分布在很大程度上决定了研究区域遭受洪水侵袭的难易程度^[22]。以河网密度和湖区缓冲区作为指标,河网密度越高,距离蓄滞洪区越近,危险性越高。其中,河网密度是指单位面积内河流的长度,湖区缓冲区是指研究区域与湖区的距离等级,本研究划定三级缓冲区(3、7、12 km)。

(3)承灾因子易损性。发生洪水灾害造成的损失程度与人口的集中度和地区经济水平有关^[23]。选择人口密度和 GDP 作为评估承灾因子易损性的指标,根据易损性与人口密度、GDP 成正比的原则确定各个因素对洪水灾害的影响程度。同时,不同土地利用类型抵抗洪水侵袭的能力也有差异,将其作为本研究区域承灾因子易损性的一项指标。研究采用陈萍等^[24]定义的土地利用敏感性指数,将土地利用类型分为五类(林地,耕地,城镇建设用地,一般调节用地和生态容纳用地)来表征其对洪水灾害的影响性。据此建立的风险区划指标体系见表 1。

表 1 洪水灾害风险区划指标体系
Tab.1 Flood disaster risk zoning indicator system

目标层	准则层	指标层
南水北调东线山东段区域洪灾风险区划	致灾因子危险性 C ₁	汛期平均暴雨强度 I ₁ /(mm·d ⁻¹)
		汛期平均暴雨日数 I ₂ /d
	孕灾因子敏感性 C ₂	高程 I ₃ /m
		高程标准差 I ₄
		河网密度 I ₅ /(km·km ²)
		湖区缓冲区 I ₆ /km
		GDP I ₇ /(元·km ²)
	承灾因子易损性 C ₃	人口密度 I ₈ /(人·km ²)
		土地利用类型 I ₉

2.2 指标权重分析

由建立的风险区划指标体系可知,本研究的目标是对南水北调东线山东段区域进行洪灾风险区划,为实现此目标,研究从致灾因子危险性 C₁、孕灾因子敏感性 C₂ 和承灾因子易损性 C₃ 三个准则层展

开分析,每一准则层又可以细分为若干个影响指标。针对本研究区域建立一个洪水风险指标重要性比例标度,用于量化指标的相对重要性,见表 2。

表 2 洪水风险指标重要性比例标度
Tab.2 important scale for flood risk index

标度	含义
1	两个指标具有相等的重要度
2	两个指标相比,前者比后者稍微重要
3	两个指标相比,前者比后者明显重要
4	两个指标相比,前者比后者绝对重要
5	两个指标相比,前者比后者极端重要
1.5,2.5,3.5,4.5	两个指标相比,重要度介于相邻标度之间

依据重要性比例标度逐层构建 4 个重要性判断矩阵为

$$P_1 = \begin{bmatrix} 1 & C_1/C_2 & C_1/C_3 \\ C_2/C_1 & 1 & C_2/C_3 \\ C_3/C_1 & C_3/C_2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 1 & I_1/I_2 \\ I_2/I_1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} 1 & I_3/I_4 & \cdots & I_3/I_6 \\ I_4/I_3 & 1 & \cdots & I_4/I_6 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_6/I_3 & I_6/I_4 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

$$P_4 = \begin{bmatrix} 1 & I_7/I_8 & I_7/I_9 \\ I_8/I_7 & 1 & I_8/I_9 \\ I_9/I_7 & I_9/I_8 & 1 \end{bmatrix}$$

用 beta-PERT 分布估计重要性判断矩阵中每个非对角元素的概率分布。对每组数据用蒙特卡罗法抽样 1 000 次,最终分析得到各个指标权重的概率密度分布。综上,南水北调东线山东段区域风险区划指标体系的权重计算结果见表 3。二阶判断矩阵 P₂ 具备完全一致性无需检验,对抽样生成的判断矩阵 P₁、P₃、P₄ 分别进行一致性检验,由图 2 检验结果可以看出,一致性比率 CR 均小于 0.1,可以接受。

3 洪水灾害风险区划

3.1 数据来源与处理方法

本研究收集并采用的气象数据来源于国家气象信息中心的 1961—2012 年 6—9 月山东省内气象站点的逐日降雨资料,地形数据来源于地理空间数据云 30 m 分辨率 DEM 数字高程,社会经济数据以及土地利用数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所的公里网格人口、GDP、土地利用类型分布数据

表 3 洪水灾害风险区划指标权重计算结果

Tab. 3 Index weights for flood disaster risk zoning

	致灾因子危险性 C_1 0.404 2	孕灾因子敏感性 C_2 0.344 2	承灾因子易损性 C_3 0.251 6	综合权重
汛期平均暴雨强度 I_1	0.457 2			0.184 8
汛期平均暴雨日数 I_2	0.542 8			0.219 4
高程 I_3		0.197 0		0.067 8
高程标准差 I_4		0.233 9		0.080 5
河网密度 I_5		0.323 3		0.111 3
湖区缓冲区 I_6		0.245 9		0.084 6
GDP I_7			0.278 1	0.070 0
人口密度 I_8			0.349 6	0.088 0
土地利用类型 I_9			0.372 3	0.093 7

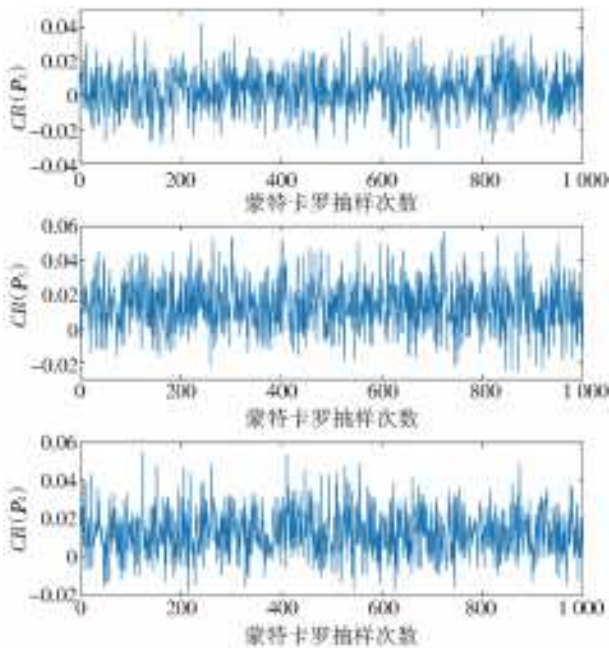


图 2 重要性判断矩阵一致性检验

Fig. 2 Consistency test of importance comparison matrix

集。本研究利用 ArcGIS 中的栅格内插、栅格计算、数据重分类、数据提取与统计分析等技术,将众多指标数据归一化处理,采用的最小计算单元为 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ 的 GRID 网格,具有高精度的特点。

3.2 区划过程

3.2.1 危险性区划

根据 1961—2012 年汛期山东省内气象站点的降雨数据,利用反距离权重法(IDW)^[25]对汛期暴雨日数和暴雨强度进行空间内插离散化处理,得到研究区域汛期年平均暴雨日数和暴雨强度的空间分布情况,通过 ArcGIS 的地图代数功能标准化处理并叠加,得到洪水灾害危险性区划图。由图 3 可以看出,南水北调东线山东段的洪水灾害危险性区划与山东省降水量分布特征有很大相似性,均呈由西北向东南逐渐增加的趋势,其中鲁南、胶东半岛东部地区的危险性相对较高。



图 3 南水北调东线山东段区域洪灾危险性区划

Fig. 3 Flood hazard zoning of research area

3.2.2 敏感性区划

南水北调东线山东段区域水系众多,地形变化明显,洪水灾害的敏感性受这些因素的影响。用极差标准化方法对研究区域的高程、高程标准差、河网密度以及湖区缓冲区 4 个孕灾因子的数据集进行处

理,赋予相应的权重值后叠加得到研究区域的洪水灾害敏感性区划图。由图 4 可以看出,鲁南片、鲁北片由于地形平坦,河网密集,并且有南四湖、东平湖等蓄水系统的存在,因此对洪水的敏感性较高;而胶东半岛河网密度较小,敏感性相对较低。

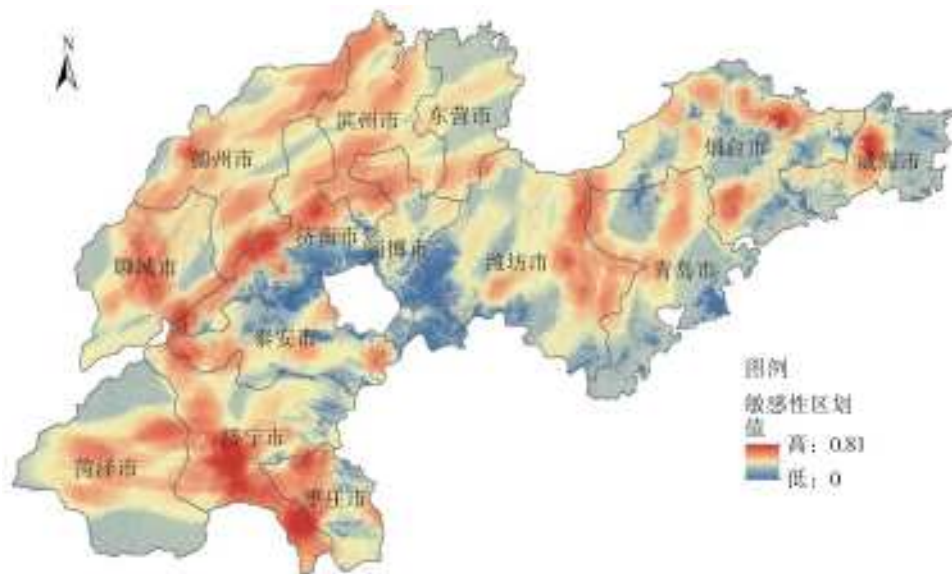


图 4 南水北调东线山东段区域洪灾敏感性区划

Fig. 4 Flood sensitivity zoning of research area

3.2.3 易损性区划

洪水灾害易损性考虑研究区域的 GDP、人口密度和土地利用类型 3 个因素。将中国公里网格人口分布数据集、山东省 GDP 空间分布数据集、山东省土地利用空间数据集进行掩膜处理和数据

标准化处理,再乘以各自的权重值,叠加得到研究区域的洪水灾害易损性区划图。由图 5 可以看出,易损性较大的区域大多位于人口集中、GDP 高的城市地区,易损性较小的区域为林地、山区等生态调节用地。



图 5 南水北调东线山东段区域洪灾易损性区划

Fig. 5 Flood vulnerability zoning of research area

3.3 区划结果分析

根据洪水灾害风险区划模型,将危险性区划、敏感性区划和易损性区划结果在 ArcGIS 上归一化处

理,采用自然断点分级法^[26]将洪灾危害程度划分为高风险性(>0.465)、较高风险性($0.390\sim0.465$)、中等风险性($0.330\sim0.390$)、较低风险性($0.264\sim$

0.330)和低风险性(<0.264)5个等级,得到南水北调东线山东段区域洪灾风险区划图。本文将区划结果分成鲁南片、鲁北片和胶东片3个区域进行分析,见图6至8。

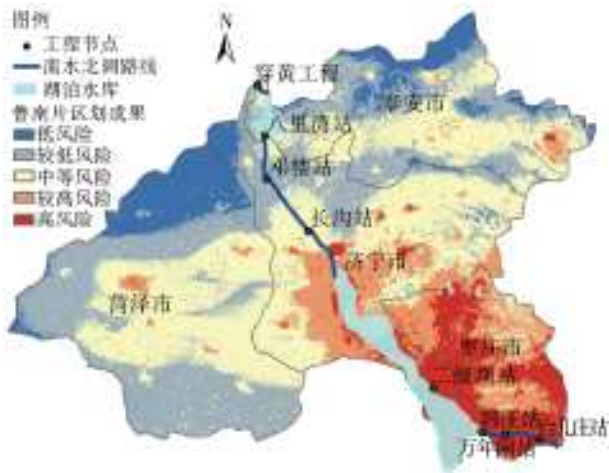


图6 南水北调东线鲁南片洪灾风险区划
Fig. 6 Risk zoning of flood disaster in south Shandong

由鲁南片风险区划图可知,高风险区集中在南四湖周边区域以及枣庄市薛城区、峰城区、台儿庄区。这片区域地势平坦,处于多个河流的中下游地带,并且汛期暴雨强度大,极易受上游暴雨洪水影响。济宁城区位于南阳湖调水出口地带,且紧靠梁济运河,也属于高风险区。韩庄运河段渠道、梁济运河段渠道以及沿线的梯级泵站是南水北调工程在鲁

南片的防汛重点。

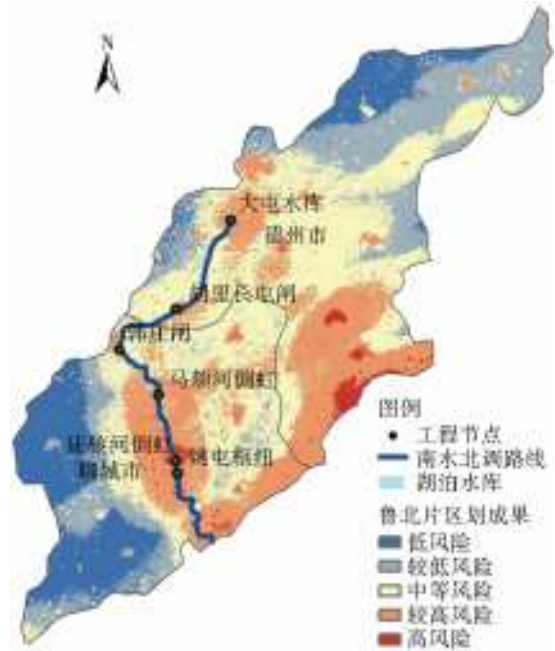


图7 南水北调东线鲁北片洪灾风险区划
Fig. 7 Risk zoning of flood disaster in north Shandong

由鲁北片风险区划结果可知,高风险区主要分布在聊城市城区、黄河北沿线的齐河县、济阳区一带。低风险区位于聊城西部、德州东北部。聊城市城区地处徒骇河以北马颊河以南,又有小运河贯穿南北,发生强降雨时周边区域极易形成洪涝灾害,因此该段工程是鲁北片的防汛重点。

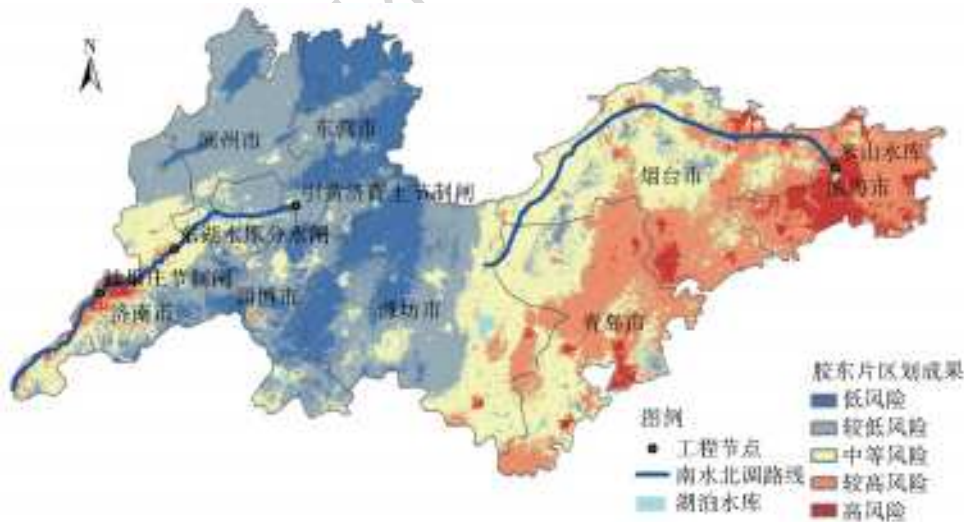


图8 南水北调东线胶东片洪灾风险区划
Fig. 8 Risk zoning of flood disaster in east Shandong

由胶东片风险区划结果可知,胶东片的高风险区主要位于济南市周边以及半岛东部局部地区。由于胶东供水干线借助引黄济青工程输水,因此南水北调工程在该区域的防汛重点为济平干渠。济平干渠输水线路以北为黄河,以南为丘陵区,汛期极易形成山前洪水,应加强防洪力度。胶东片中部地区由

于历史降雨量普遍较低,因此导致洪灾风险性低。

本文根据《中国气象灾害大典 山东卷》中记载的1971—2000年山东洪涝灾情普查数据,分析得到研究区域的洪水灾害灾情统计见表4,表明区划结果可以较好地反映研究区域洪水灾害发生的真实情况。进一步比较李楠等^[27]就同一区域的洪灾风险

区划研究结果,发现与本文图 6 至 8 的风险分布情况基本相符。

表 4 南水北调东线山东段区域 1971—2000 年洪水灾情统计
Tab. 4 Statistics of flood disaster in the research area from 1971 to 2000

统计指标	高风险、较高 风险区域	中等风险 区域	较低风险、低 风险区域
面积比例/%	29.90	28.41	41.69
特大暴雨/场	35	19	23
直接经济损失/亿元	193	95	108
受灾人口/万人	6 341.6	4 359.8	5 152.6

4 结 论

(1) 本文从致灾因子危险性、孕灾因子敏感性和承灾因子易损性 3 个方面对南水北调东线山东段区域的洪水灾害风险展开分析,具体选取汛期暴雨日数、汛期暴雨强度、高程、高程标准差、河网密度、湖区缓冲区、GDP、人口密度、土地利用类型等 9 个研究指标,计算权重系数后在 ArcGIS 上叠加处理,定性半定量地分析洪水灾害风险,为南水北调工程防汛决策以及研究区域的洪水防治提供科学依据。

(2) 将蒙特卡罗法与层次分析法相结合建立洪水灾害风险区划模型,最大限度地降低群体决策对风险指标权重计算的不确定性影响,使风险区划结果更客观合理,更具参考价值。

(3) 风险区划结果表明:南水北调东线山东段鲁南片的高风险区主要分布在枣庄市、济宁市内的南四湖周边区域;鲁北片的高风险区主要分布在聊城城区、黄河以北沿线一带;胶东片的高风险区主要位于济南市周边以及半岛东部局部地区。南水北调东线山东段工程的防汛重点为韩庄运河渠道、梁济运河渠道、沿线梯级泵站、聊城城区段工程、济平干渠工程等。

参考文献(References):

[1] 刘恒,耿雷华.南水北调运行风险管理关键技术问题研究[M].北京:科学出版社,2011.(LIU H,GENG L H. Research on key technology in risk management during operation of South-to-North Water Diversion Project[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))

[2] HU S S, CHENG X J, ZHOU D M, et al. GIS-based flood risk assessment in suburban areas: a case study of the Fangshan district, Beijing[J]. Nat Hazards, 2017, 87(3): 1525-1543. DOI: 10. 1007/s11069-017-2828-0.

[3] XU H S, MA C, LIAN J J, et al. Urban flooding risk

assessment based on an integrated k-means cluster algorithm and improved entropy weight method in the region of Haikou, China [J]. Journal of Hydrology, 2018; S0022169418304827-. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2018. 06. 060.

- [4] SAATY T L. Modeling unstructured decision problems-the theory of analytical hierarchies [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 1978, 20 (3): 147-158. DOI: 10. 1016/0378-4754(78)90064-2.
- [5] LIU J F, WANG X Q, ZHANG B, et al. Storm flood risk zoning in the typical regions of Asia using GIS technology [J]. Natural Hazards, 2017, 87 (3): 1691-1707. DOI: 10. 1007/s11069-017-2843-1.
- [6] LAI C G, SHAO Q X, CHEN X H, et al. Flood risk zoning using a rule mining based on ant colony algorithm [J]. Journal of Hydrology, 2016; S0022169416305546. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2016. 09. 003.
- [7] 陈鹏,孙滢悦,张立峰,等.基于 GIS 的城市洪水灾害风险评价及时空演变——以哈尔滨市为例[J].南水北调与水利科技,2014,12(3):170-175.(CHEN P,SUN Y Y,ZHANG L F, et al. Research on risk assessment and spatio-temporal variation of urban flood disaster based on GIS: A case study in Harbin. [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(3): 170-175. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2014. 03. 037.
- [8] 李林涛,徐宗学,庞博,等.中国洪灾风险区划研究[J].水利学报,2012,43(1):22-30.(LI L T, XU Z X, PANG B, et al. Flood risk zoning in China. [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43 (1): 22-30. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2012. 01. 001.
- [9] 周成虎,万庆,黄诗峰,等.基于 GIS 的洪水灾害风险区划研究[J].地理学报,2000(1):15-24.(ZHOU C H, WAN Q, HUANG S F, et al. A GIS-based Approach to Flood Risk Zonation [J]. Acta Geographica Sinica, 2000 (1): 15-24. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 0375-5444. 2000. 01. 003.
- [10] 苑希民,桑林浩,沈福新,等.基于模糊层次分析法的京津冀洪灾风险评价[J].水利水电技术,2018,49(10):37-45.(YUAN X M, SANG L H, SHEN F X, et al. FAHP-based flood risk assessment on Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(10): 37-45. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrahe. 2018. 10. 006.
- [11] 兰继斌,徐扬,霍良安,等.模糊层次分析法权重研究[J].系统工程理论与实践,2006,26(9):107-112.(LAN J B, XU Y, HUO L A, et al. Research on the priorities of fuzzy analytical hierarchy process [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2006, 26

- (9): 107-112. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-6788. 2006. 09. 014
- [12] GIGOVIC L, PAMUCAR D, BAJIC Z, et al. Application of GIS-Interval rough AHP methodology for flood hazard mapping in urban areas[J]. *Water-Sui*, 2017, 9(6): 360. DOI: 10. 3390/w9060360.
- [13] 徐镇凯, 黄海鹏, 魏博文, 等. 基于系统多层次灰色模型的洪灾风险综合评价方法——以鄱阳湖流域为例[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(1): 20-23. (XU Z K, HUANG H P, WEI B W, et al. Comprehensive evaluation method of flood risk based on multi-level gray system model: A case study in Poyang Lake basin[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(1): 20-23 (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2015. 01. 005.
- [14] CAO C, WANG Q, CHEN J P, et al. Landslide susceptibility mapping in vertical distribution law of precipitation area; case of the Xulong Hydropower Station reservoir, Southwestern China[J]. *Water-Sui*, 2016, 8(7). DOI: 10. 3390/w8070270.
- [15] 王英. 基于 GIS 及综合权重法的甘肃黄土高原区山洪灾害风险区划研究[J]. *中国农村水利水电*, 2018(8): 118-122. (WANG Y. The risk regionalization of torrential flood disaster in loess plateau region in Gansu based on GIS and comprehensive weight method[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2018 (8): 118-122. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: ZNSD. 0. 2018-08-024.
- [16] 张骞. 基于 GIS 的北京地区山洪灾害风险区划研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2014. (ZHANG Q. Study on risk regionalization of mountain flood disasters in Beijing based on GIS [D]. Beijing: Capital Normal University, 2014. (in Chinese))
- [17] 林凯荣, 陈晓宏, 江涛. 基于 Beta-PERT 分布的水文模型参数不确定性分析[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2010, 49(4): 139-143. (LIN K R, CHEN X H, JIANG T. Parameter uncertainty analysis of hydrological model based on Beta-PERT distribution [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2010, 49(4): 139-143. (in Chinese))
- [18] Risk analysis; a quantitative guide, 3d ed[M]. Scitech Book News, Portland; Ringgold Inc. 2008.
- [19] 李岩. 基于 GIS 的北京山区地质灾害风险评价研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2008. (LI Y. Research on risk assessment of geological hazards in Beijing mountain area based on GIS [D]. Beijing: Capital Normal University, 2008. (in Chinese))
- [20] 岳琦, 张林波, 刘成程, 等. 基于 GIS 的福建闽江上游山洪灾害风险区划[J]. *环境工程技术学报*, 2015, 5(4): 293-298. (YUE Q, ZHANG L B, LIU C C, et al. GIS-based risk zoning of flood disasters in upstream of the Minjiang River [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2015, 5 (4): 293-298. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-991X. 2015. 04. 047.
- [21] 钟晋阳. 基于 GIS 的浙江省洪水灾害风险区划 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2009. (ZHONG J Y. Zoning of flood disaster risk in Zhejiang Province based on GIS [D]. Wulumuqi: Xinjiang Agricultural University, 2009. (in Chinese))
- [22] 姜永生. 南水北调东线工程环境影响及对策[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2012. (JIANG Y S. Environmental Impacts and countermeasures of the East Route of South-to-North Water Transfer Project [M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 2012. (in Chinese))
- [23] 张杰, 吴明业. 基于 GIS 的皖南地区暴雨洪涝灾害风险区划[J]. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(6): 121-129. (ZHANG J, WU M Y. Rainstorm and flood risk regionalization in Southern Anhui Province based on GIS [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38 (6): 121-129. (in Chinese)) DOI: 10. 7621/cjarrp. 1005-9121. 20170617.
- [24] 陈萍, 王兴玲, 陈晓玲. 基于栅格的鄱阳湖生态经济区洪灾脆弱性评价[J]. *地理科学*, 2012, 32(8): 958-964. (CHEN P, WANG X L, CHEN X L. Flood vulnerability assessment of Poyang Lake economical ecological zone at raster level [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(8): 958-964. (in Chinese)) DOI: 10. 13249/j. cnki. sgs. 2012. 08. 008.
- [25] 贾悦, 崔宁博, 魏新平, 等. 基于反距离权重法的长江流域参考作物蒸散量算法适用性评价[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(6): 130-138. (JIA Y, CUI N B, WEI X P, et al. Applicability evaluation of different algorithms for reference crop evapotranspiration in Yangtze River basin based on inverse distance weighted method [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (6): 130-138. (in Chinese)) DOI: 10. 11975/j. issn. 1002-6819. 2016. 06. 018.
- [26] CHRYSOCHOOU M, JOHNSTON C P, DAHAL G. A comparative evaluation of hexavalent chromium treatment in contaminated soil by calcium polysulfide and green-tea nanoscale zero-valent iron[J]. *J Hazard Mater*, 2012, 201: 33-42. DOI: 10. 1016/j. jhazmat. 2011. 11. 003.
- [27] 李楠, 任颖, 顾伟宗, 等. 基于 GIS 的山东省暴雨洪涝灾害风险区划[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(20): 313-317. (LI N, REN Y, GU W Z, et al. GIS Based risk evaluation for flood hazard in Shandong Province [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(20): 313-317. (in Chinese))