

基于云模型的汉江上游安康市洪水灾害风险评价

石晓静, 查小春, 刘嘉慧, 王光朋

(陕西师范大学旅游与环境学院, 陕西 西安 710062)

摘要: 为了加强洪水灾害风险管理, 用云模型的方法对安康市 1983 年和 2010 年的洪水灾害风险进行评价。在实地调查的基础上, 选取 8 个代表性的指标, 建立评价指标体系; 采用熵权法计算指标的权重, 引入云模型的方法获取洪灾风险隶属度; 将权重和隶属度进行转化计算, 按照最大隶属度原则, 得到 2010 年和 1983 年的洪灾风险等级。结果表明: 2010 年与 1983 年相比, 安康市洪水灾害风险在增加, 但部分县区变化不一; 高风险主要集中在汉滨区、汉阴县等区域, 面积比较稳定; 较高风险、较低风险区域增加, 中等风险、低风险区域减少; 相邻风险等级之间的转化是洪水灾害风险增加的本质表现。

关键词: 洪水灾害; 风险评价; 云模型; 熵权法; 安康市

中图分类号: P426.616

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2017)03-0029-06

Cloud model-based risk assessment of flood disasters in Ankang City on upper reaches of Hanjiang River//SHI Xiaojing, ZHA Xiaochun, LIU Jiahui, WANG Guangpeng(*Tourism and Environment College, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China*)

Abstract: To improve the risk management of flood disasters, risk assessment of flood disasters of 1983 and 2010 in Ankang City was conducted using the cloud model. Eight typical indexes were selected to establish an assessment index system based on field investigation. The entropy method was used to calculate the index weights, and the cloud model was introduced to obtain the membership degrees of flood risk. Through conversion between the index weights and membership degrees, the levels of flood risk of 2010 and 1983 were obtained by means of the principle of maximum membership. Results show that the level of flood risk of 2010 increased as compared to that of 1983 in Ankang City, but the risk changes were different in some counties. Areas with high flood risk were mainly concentrated in the Hanbin District and Hanyin County, and the sizes of those areas were almost unchanged. Areas with relatively high or low flood risk increased, while, areas with moderate or low flood risk decreased. The conversion between adjacent levels of flood risk is the natural behavior when the flood risk increases.

Key words: flood disaster; risk assessment; cloud model; entropy method; Ankang City

洪水灾害是一种危害严重的自然灾害, 也是我国面临的主要环境问题之一, 它严重威胁着人民的生命财产安全^[1-2]。近年来, 在全球气候变化引起极端降水事件不断增多的背景下, 洪水灾害发生的频率逐渐增加、破坏力增强, 给人类造成的损失并没有因为经济的发展而有所降低, 反而有逐年上升的趋势^[3-5], 这促使人们的洪灾风险管理理念发生转变, 在加强防洪工程建设的同时, 越来越重视非工程措施^[6-7], 特别是洪水灾害风险评价工作。然而, 洪水灾害是多种因素相互作用的结果, 各种因素具有随机性、模糊性的特点, 使得洪灾风险的等级难以明确界定, 而云模型通过定量数据和定性概念之间的转换, 可以解决这一不确定性问题^[8-10]。目前, 国内一

些学者已经将云模型引入洪水灾害风险以及其他领域的评价研究中, 例如田玉刚等^[8]将云模型与数据场耦合, 评估了苏州市和上海市的洪水灾害风险等级; 王贺等^[9]建立了基于正态云模型的景德镇市洪水灾害风险评价模型; 刘洋等^[10]建立云物元耦合模型, 评价分析了荆江分洪区的洪水灾害危险性; 周启刚等^[11]利用正态云模型评价了三峡库区的土地利用生态风险情况; 王栋等^[12-13]引用云模型分析了水体质量问题, 等等。

汉江为长江最大的支流, 其上游为南水北调中线工程重要水源区^[14], 而安康市是汉江上游的重要城市, 历来是洪灾多发区。根据曹丽娟等^[15]对黄河和长江流域在未来气候变化下极端径流影响的预

估研究发现,未来汉江流域发生洪水的可能性将逐渐增大,因此,对汉江上游安康市洪水灾害进行风险评价显得尤为重要,但是近年来这方面的研究尚不多见。针对洪水灾害风险评价过程中存在的模糊性、随机性问题,采用云模型的方法,建立了基于云模型和熵权法的洪水灾害风险评价模型,以1983年和2010年的洪水灾害为例,评价分析了安康市各县区的洪水灾害风险,以期为加强灾害预警,制定科学防洪减灾规划,合理指导灾后重建工作,最大限度地减轻洪灾损失,促进安康市经济社会健康稳定可持续发展提供借鉴。

1 研究区概况

安康市位于陕西省东南部,下辖汉滨、汉阴、石泉、紫阳、岚皋、平利、宁陕、镇坪、旬阳、白河等1区9县(图1),处于秦岭、大巴山的中间位置,地势起伏较大,中间低,南北两侧高,地形以山地、丘陵为主,川道盆地面积较小,主要有汉阴盆地、安康盆地、恒口盆地等,其中以汉滨区的恒口盆地面积最大。汉江干流由石泉入境,流经石泉、汉阴、紫阳、汉滨、旬阳、白河6个县区,于白河县出境,境内流域长340 km,其余河流均属汉江水系,呈羽毛状分布于汉江两岸,主要有月河、旬河、黄洋河、岚河等。安康市受季风影响显著,属于亚热带季风气候。夏季受西南季风和东南季风交替影响以及地形的作用,容易出现暴雨洪水;秋季冷空气与暖湿气流影响出现连阴雨过程,也极易引起洪水。复杂的地形地貌、密集的水系和大气环流状况使安康市成为洪灾多发区^[16-17]。

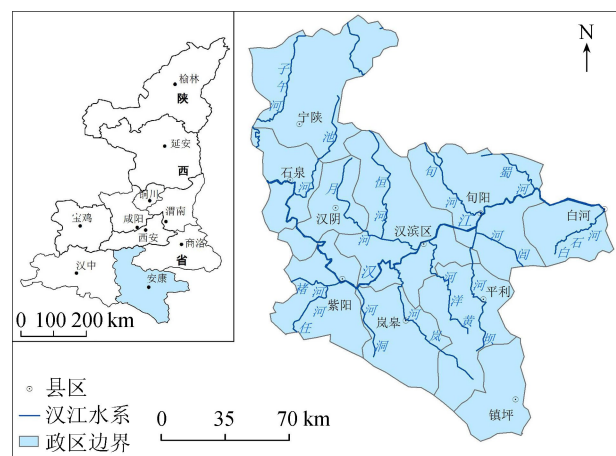


图1 研究区域位置

据统计^[17-18],1950年以来,安康市发生洪峰流量大于 $15\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪灾26次,平均2.5 a发生1次。尤其是1983年的特大洪水,受东南季风和西南季风的影响,多个县区年降水量在 $1\,100\text{ mm}$ 以上,汛期降水移动方向与河流流向一致,多条支流汇

入干流,导致河流洪峰流量大,地势较低的区域水位升高,形成安康市200年一遇的特大洪水。这一洪水造成汉滨区、汉阴县、石泉县、旬阳县等多个县区房屋倒塌、农田淹没、水利水电等基础设施损坏等,经济损失巨大,导致安康老城区基本被毁。自进入21世纪以来,安康市在2005年、2010年、2011年等均发生严重的洪水灾害,其中汉江流域2010年7月18—19日普降大到暴雨,造成汉江干流发生50年一遇洪水,暴雨、山洪、泥石流灾害多处爆发,使安康市遭受了1983年洪灾之后最严重的一次特大洪灾,直接经济损失67.11亿元。为此,选取1983年和2010年洪灾为例,评价分析安康市各县区的洪水灾害风险。

2 数据来源和云模型研究方法

2.1 数据来源

采用30 m分辨率的DEM数据提取安康市地形图及河网密度图;1983年和2010年降水量数据由安康市气象局提供;1983年和2010年的人口密度、GDP密度、耕地比重、单位面积粮食产量等社会、经济数据,以县级行政区为单位,分别以《1949—1990年陕西省地市县历史统计资料汇编》^[19]以及《2011年安康统计年鉴》^[20]统计。

2.2 正态云模型

云模型是由李德毅院士^[21-23]提出的,实现客观世界中某个现象和事物的定性概念与定量相互发生不确定性转换的数学模型^[24-25],它以正态分布和隶属度函数为基础,能够解决洪水灾害风险评价过程中的模糊性和随机性问题,对评价对象进行比较客观有效的评价,具有普遍的适用性^[26]。

对于云的定义为:设 U 为论域, C 是论域 U 上的定性概念,若定量值 $x \in U$, x 对 C 的隶属函数 $u(x) \in [0,1]$ 是具有稳定倾向的随机数($U \in [0,1], \forall x \in U, x \rightarrow u(x)$),且 x 是定性概念 C 的一次随机实现。若满足: $x \sim N(E_x, E'_x)^2$, $E'_x \sim N(E_n, H^2)$,且对 C 的隶属度满足:

$$u(x) = e^{-\frac{(x-E_x)^2}{2E'_x}} \quad (1)$$

则称 x 在论域 U 上的分布为正态云。式中: E_x 为期望值; E_n 为熵值; H 为超熵值。每一个 x 称为一个云滴,表示一次定性到定量的转化, n 个云滴形成正态云模型,可以完整地表示定性概念向定量数值的转化。

正态云模型用期望值 E_x 、熵值 E_n 和超熵值 H 3个数值来表示,其中,期望值 E_x 代表这个定性概念的中心值;熵值 E_n 是对定性概念模糊度的度量,

反映了在论域中 x 的取值范围, E_n 值越大, x 的取值范围越广, 概念越宏观; 超熵值 H 是熵值 E_n 的熵, 是对期望值 E_x 的不确定性度量, 由熵的随机性和模糊性共同决定, 反映了云滴的离散程度, H 越大, 云的厚度越大, 云滴越分散。由以上 3 个数值确定 n 个云滴, 把一个定性概念通过正态云模型定量地表示出来(图 2)。

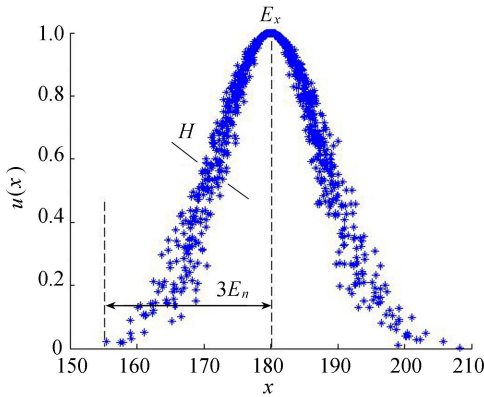


图 2 正态云及数字特征 ($E_x = 180, E_n = 8, H = 1$)

3 安康市洪水灾害风险评价

3.1 安康市洪水灾害风险评价指标的选取

洪水灾害是一个复合系统, 它的形成是致灾因子、孕灾环境、承载体三者相互作用的结果^[27]。在进行洪水灾害风险评价研究的过程中, 其首要任务就是选取合适的评价指标。由于研究区域的不同, 选取的指标存在很大的差异。在实地调查的基础上, 根据安康市近些年来洪水灾害的发生及受灾情况, 选取年降水量作为致灾因子指标, 选取高程、高程标准差、河网密度作为孕灾环境指标, 选取人口密度、GDP 密度、耕地比重、单位面积粮食产量等作为承载体指标, 据此建立安康市合理的评价指标体系如表 1 所示。

表 1 安康市洪水灾害风险评价指标体系

洪水灾害风险评价指标体系	孕灾环境	高程 U_1
		高程标准差 U_2
		河网密度 U_3
	致灾因子	年降水 U_4
	承载体	人口密度 U_5
		GDP 密度 U_6
		单位面积粮食产量 U_7
		耕地比重 U_8

在 ArcGIS10.0 的 ArcMap 中, 加载安康市行政

表 2 安康市 1983 年洪水灾害风险评价指标体系标准

风险等级	U_1/m	U_2/m	U_3/km	U_4/mm	$U_5/(人 \cdot km^{-2})$	$U_6/(万元 \cdot km^{-2})$	$U_7/(t \cdot km^{-2})$	$U_8/\%$
低风险	[373, 856]	[27.240, 88.980]	[1.25, 1.31]	[905.3, 953.5]	[19.385, 38.049]	[0.5122, 0.8656]	[151.8113, 155.8235]	[0.0227, 0.0566]
较低风险	[353, 373]	[23.055, 27.240]	[1.31, 1.40]	[953.5, 1193.9]	[38.049, 89.876]	[0.8656, 1.8622]	[155.8235, 167.3834]	[0.0566, 0.1069]
中等风险	[333, 353]	[14.985, 23.055]	[1.40, 1.46]	[1193.9, 1305.6]	[89.876, 115.780]	[1.8622, 3.1062]	[167.3834, 234.3510]	[0.1069, 0.1527]
较高风险	[240, 333]	[3.780, 14.985]	[1.46, 1.51]	[1305.6, 1450.3]	[115.780, 147.086]	[3.1062, 4.1457]	[234.3510, 316.3056]	[0.1527, 0.1717]
高风险	[189, 240]	[3.715, 3.780]	[1.51, 1.55]	[1450.3, 1679.3]	[147.086, 213.034]	[4.1457, 6.6584]	[316.3056, 357.9633]	[0.1717, 0.2021]

区图及评价指标的具体量化数据表, 利用自然段点法对安康市 1983 年和 2010 年的评价指标划分评价标准, 表 2 为安康市 1983 年洪水灾害风险评价指标体系标准。

3.2 安康市洪水灾害风险评价

3.2.1 熵权法计算各评价指标的权重

由于选取的评价指标单位不同, 需要进行无量纲化处理。采用正向指标和负向指标将其量化到 0~1 之间, 建立归一化矩阵 $(r_{ij})_{m \times n}$, 然后采用熵权法^[28-30]计算各评价指标权重。

a. 计算各指标的熵值:

$$H_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (2)$$

其中 $f_{ij} = (1 + r_{ij}) / \sum_{i=1}^m (1 + r_{ij})$

式中: f_{ij} 为指标 r_{ij} 的比重; m 为评价对象数。

b. 计算第 j 个评价指标的熵权:

$$W_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^n (1 - H_j)} \quad (3)$$

式中: n 为评价指标数; W_j 为评价指标 j 的权重。

由公式 (2) (3) 计算出各评价指标的权重:

$W_{u_1} = 0.1083$ 、 $W_{u_2} = 0.1273$ 、 $W_{u_3} = 0.1083$ 、 $W_{u_4} = 0.1167$ 、 $W_{u_5} = 0.1169$ 、 $W_{u_6} = 0.1077$ 、 $W_{u_7} = 0.2128$ 、 $W_{u_8} = 0.1020$ 。

3.2.2 基于云模型的安康市洪水灾害风险评价结果

根据安康市洪水灾害风险评价指标体系标准(表 2), 利用公式 (4) (5) (6)^[10-11, 29-30] 计算 E_x 、 E_n 、 H , 得到 1983 和 2010 年安康市各县区评价指标所对应的正态云模型 3 个数值的等级标准。表 3 为安康市 1983 年洪水灾害风险评价指标正态云标准。

$$E_{xij} = \frac{x_{ij,1} + x_{ij,2}}{2} \quad (4)$$

$$E_{nij} = \frac{x_{ij,1} - x_{ij,2}}{2.355} \quad (5)$$

$$H = k \quad (6)$$

式中: E_{xij} 、 E_{nij} 分别为表 3 中第 i 个指标对应第 j 个风险等级的 E_x 、 E_n 值; x_{ij} 为表 2 中第 i 个指标对应第 j 个风险等级的隶属度; $x_{ij,1}$ 、 $x_{ij,2}$ 分别为评价指标体系标准的上下边界值; k 为常数, 可以通过经验或试验取值。

表3 安康市 1983 年洪水灾害风险评价指标正态云标准

风险等级	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8
低风险	(614.5, 205.0955, 0.05)	(28.085, 5.4904, 0.02)	(1.28, 0.0255, 5)	(929.4, 20.4671, 0.02)	(28.7174, 7.9251, 0.05)	(0.6889, 0.1501, 0.02)	(153.8174, 1.7037, 0.05)	(0.0422, 0.0123, 2)
较低风险	(317.5, 5.5202, 0.05)	(15.635, 2.3907, 0.02)	(0.8059, 0.0386, 5)	(1073.7, 102.0807, 0.02)	(63.963, 22.0075, 0.05)	(1.3639, 0.4232, 0.02)	(161.6035, 4.9087, 0.05)	(0.0818, 0.0214, 2)
中等风险	(264, 39.9151, 0.05)	(11.585, 1.0488, 0.02)	(0.8688, 0.0147, 5)	(1249.75, 47.4310, 0.02)	(102.8284, 10.9992, 0.05)	(2.4842, 0.5282, 0.02)	(200.8672, 28.4363, 0.05)	(0.1298, 0.0194, 2)
较高风险	(200.5, 14.0127, 0.05)	(6.745, 3.0616, 0.02)	(0.9217, 0.0302, 5)	(1377.95, 61.4437, 0.02)	(131.4334, 13.2937, 0.05)	(3.6260, 0.4414, 0.02)	(275.3283, 34.8003, 0.05)	(0.1622, 0.0081, 2)
高风险	(174, 8.4926, 0.05)	(2.635, 0.4289, 0.02)	(0.9825, 0.0214, 5)	(1564.8, 97.2399, 0.02)	(180.0604, 28.0031, 0.05)	(5.4021, 1.0670, 0.02)	(337.1345, 17.6890, 0.05)	(0.1869, 0.0129, 2)

以 1983 年致灾因子 U_4 为例,根据公式(1)和云矩阵(表 3),在 Matlab 2014a 中重复运行 1000 次,得到 U_4 对应的不同等级的正态云隶属度函数(图 3)。可以看出,图 3 较好地反映了隶属度函数中的正态分布函数特征。

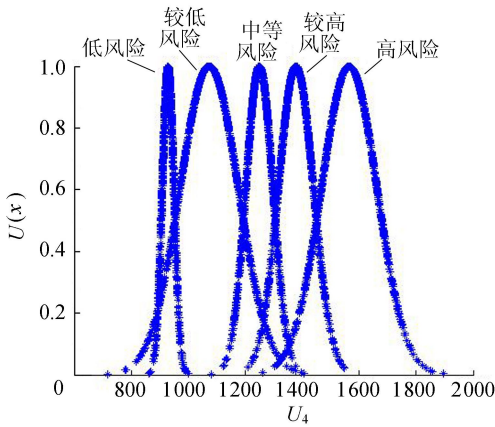


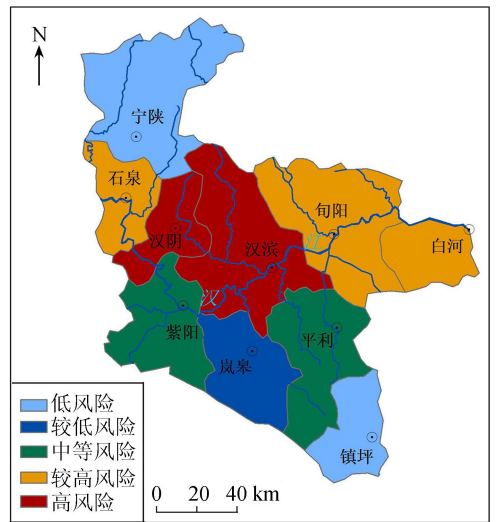
图3 1983 年致灾因子 U_4 的正态云隶属度函数

以汉滨区为例,将对应的指标量化数值代入正态云模型,在 Matlab 2014a 中重复运行 1000 次并求平均值,得到 1983 年和 2010 年各评价指标对应的不同等级的隶属度矩阵。表 4 为安康市汉滨区 1983 年指标的隶属度。按照此方法,依次得到其他县区 1983 年和 2010 年的指标隶属度。

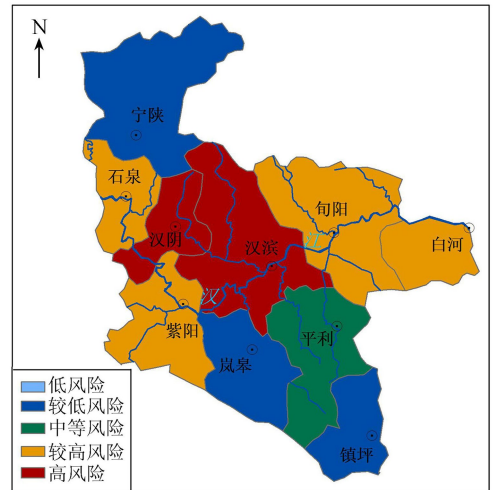
表4 安康市汉滨区 1983 年指标隶属度

风险等级	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8
低风险	0.1887	0.0001	0.9996	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9988
较低风险	0.0000	0.0000	0.9997	0.9413	0.0000	0.0000	0.0000	0.9995
中风险	0.0000	0.0000	0.9996	0.0123	0.0000	0.0053	0.0000	0.9759
较高风险	0.4991	0.4936	1.0000	0.0001	0.0000	0.4384	0.1140	1.0000
高风险	0.5013	0.5473	1.0000	0.0000	0.4977	0.4918	0.8309	0.9998

利用权重 W 与隶属度矩阵 Z 进行模糊转换得到模糊等级 $B(B=WZ)$ 。依据最大隶属度原则,选择最大的隶属度所对应的等级作为安康市汉滨区的洪灾风险评价结果。依此步骤,可得安康市 1983 年和 2010 年其他各县的洪水灾害风险等级结果如图 4 所示。



(a) 1983年



(b) 2010年

图4 安康市洪水灾害风险等级分布

由图 4 可知,2010 年与 1983 年相比较,安康市洪水灾害风险区域发生了局部变化,整体风险在增加。洪水灾害高风险在 1983 年和 2010 年均分布在汉江干流沿岸的汉滨区和汉阴县,占安康市总面积的 21.94%,其原因是这两个县区处于安康盆地,地势平坦,河网密集,汛期降水时径流易于汇集致灾,因此孕灾环境和致灾因子危险性高;此外汉滨区和汉阴县经济比较发达,人口、城镇密集,承载体的脆

弱性高。例如 1983 年洪水使安康市老城区被淹, 89 600 人受灾, 870 人遇难, 倒塌房屋 3 万余间, 损失 4.1 亿元, 同时农村受灾农户 72 015 户, 损坏房屋近 2 万间^[31]; 汉阴县 48 325 人受灾, 倒塌房屋 3 506 间, 死亡 2 人等^[32]。而在 2010 年的安康市洪灾中, 汉滨区和汉阴县县城进水, 受灾严重^[20]。

洪水灾害较高风险 1983 年分布在石泉、旬阳、白河 3 县, 而在 2010 年在紫阳县也成为了洪水灾害较高风险区域。其原因是汉江流经这些县, 地势较低, 人口多分布在河流两岸的川道平地区域, 洪灾威胁性大。例如 1983 年洪水石泉县受灾 23 652 户, 占全县人口 75.3%, 房屋损坏 1 000 余间^[33]; 白河县的各处街道、房屋、农田等被淹^[34]; 旬阳县 4 430 户受灾, 冲毁房屋 24 620 间, 农田 1 114 hm², 使 7 922 人无家可归^[35]。而在 2010 年安康洪灾中, 紫阳县处于暴雨中心, 最大降水量达 1 183 mm, 多处水文站超出警戒水位, 导致道路、房屋被淹, 水电等设施中断, 给人们生产生活造成很大损失^[20]。

洪水灾害中等风险在 1983 年分布在紫阳县和平利县, 2010 年仅分布在平利县。1983 年较低风险仅集中在岚皋县, 但在 2010 年镇坪县和宁陕县成为了洪水灾害较低风险区域, 使 2010 年洪水安康市洪灾风险缺少了低风险等级。其原因是这两县分别处于秦岭、大巴山区, 山地多, 地势高且起伏大, 孕灾环境相对稳定, 而经济发展和人类活动对环境的影响增强, 使其洪灾风险等级低由低风险转变为较低风险。调查发现, 在 2010 年安康发生洪水时, 宁陕、镇坪遭遇暴雨引起的山地泥石流, 导致多处房屋倒塌, 镇坪县移动、联通信号中断, 损坏堤防 511 处, 冲毁其它水利基础设施 234 处等^[20], 说明宁陕县、镇坪县要关注山地泥石流等地质灾害的风险, 但从洪水风险来看, 洪水风险等级比较低。由此可见, 2010 年与 1983 年相比, 安康市洪水灾害风险是在逐渐增加的。因此, 对于风险等级较高的汉滨区、汉阴县、石泉县、紫阳县、旬阳县、白河县等, 政府部门应划为重点防御区域, 加大防洪设施投入力度, 建设高标准的水利工程, 以有效地调蓄洪峰, 同时提高信息收集效率, 加强灾害预警, 提高灾后恢复能力。而对洪灾风险等级较低的宁陕县、镇坪县等, 应加大暴雨引起的滑坡、泥石流等地质灾害减灾措施。

4 结 语

为加强洪水灾害风险管理工作, 针对洪水灾害的不确定性特征, 从引起洪水灾害的致灾因子、孕灾环境、载体三方面出发, 选取合理的评价指标, 引入云模型的方法, 建立了基于云模型的洪水灾害风

险评价模型, 评价分析了安康市 1983 年与 2010 年的洪水灾害风险。结果表明, 2010 年和 1983 年相比, 安康市洪水灾害风险分布发生了局部变化, 整体风险等级在增加。高风险主要集中在汉滨区、汉阴县等区域, 其原因在于这些县区位于汉江干流及其支流交汇处的下游地区, 地势平坦, 径流汇集, 人口密度大, 城镇化水平高。而较高风险、较低风险区域在增加; 中等风险、低风险区域减少。相邻洪水灾害风险等级之间的转化是洪水灾害风险增加的本质表现。例如紫阳县的洪水灾害风险等级由中等风险转变为较高风险, 洪水灾害风险增大。评价结果可为安康市加强灾害预警, 与时俱进、科学指导防洪减灾, 提高人们的防洪意识, 为灾后重建工作提供保障。

参考文献:

- [1] 马国斌, 蒋卫国, 李京, 等. 中国短时洪涝灾害危险性评估与验证[J]. 地理研究, 2012, 31(1): 35-44. (MA Guobin, JIANG Weiguo, LI Jing, et al. Assessment and validation of short-term flood hazards in China [J]. Geographical Research, 2012, 31(1): 35-44. (in Chinese))
- [2] 杨佩国, 靳京, 赵东升, 等. 基于历史暴雨洪涝灾情数据的城市脆弱性定量研究: 以北京市为例[J]. 地理科学, 2016, 36(5): 733-741. (YANG Peiguo, JIN Jing, ZHAO Dongsheng, et al. An urban vulnerability study based on historical flood data: a case study of Beijing [J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(5): 733-741. (in Chinese))
- [3] 尹卫霞, 余瀚, 崔淑娟, 等. 暴雨洪水灾害人口损失评估方法研究进展[J]. 地理科学进展, 2016, 35(2): 148-158. (YIN Weixia, YU Han, CUI Shujuan, et al. Review on methods for estimating the loss of life induced by heavy rain and floods [J]. Progress in Geography, 2016, 35(2): 148-158. (in Chinese))
- [4] 石勇, 许世远, 石纯, 等. 洪水灾害脆弱性研究进展[J]. 地理科学进展, 2009, 28(1): 41-46. (SHI Yong, XU Shiyuan, SHI Chun, et al. A review on development of vulnerability assessment of floods [J]. Progress in Geography, 2009, 28(1): 41-46. (in Chinese))
- [5] 方建, 杜鹏, 徐伟, 等. 气候变化对洪水灾害影响研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(9): 1085-1093. (FANG Jian, DU Juan, XU Wei, et al. Advances in the study of climate change impacts on flood disaster [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(9): 1085-1093. (in Chinese))
- [6] 刘树坤. 国外防洪减灾发展趋势分析[J]. 水利水电科技进展, 2000, 20(1): 2-9. (LIU Shukun. Analysis of development trend of overseas flood control and disaster mitigation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2000, 20(1): 2-9. (in Chinese))

- [7] 孙莉英,倪晋仁,蔡强国,等. 中国洪水灾害风险县(市)统计分布特征研究[J]. 自然灾害学报,2013,28(3):391-401. (SUN Liying, NI Jinren, CAI Qiangguo, et al. Statistical distribution characteristics of counties and cities for flood risk in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2013,28(3):391-401. (in Chinese))
- [8] 田玉刚,杜渊会,覃东华,等. 基于数据场和云模型的洪水灾害风险等级评估[J]. 中国安全科学学报,2011,21(8):158-163. (TIAN Yugang, DU Yuanhui, ZHANG Donghua, et al. Flood risk evaluation methods based on data field and cloud model [J]. China Safety Science Journal,2011,21(8):158-163. (in Chinese))
- [9] 王贺,刘高峰,王慧敏. 基于云模型的城市极端雨洪灾害风险评价[J]. 水利经济,2014,32(2):15-18. (WANG He, LIU Gaofeng, WANG Huimin. Urban extreme rainstorm flood loss based on cloud model[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2014,32(2):15-18. (in Chinese))
- [10] 刘洋,赵月平. 洪水灾害危险性评估的云物元耦合模型[J]. 中国农村水利水电,2014(7):101-103. (LIU Yang, ZHAO Yueping. The assessment method of flood hazard based on cloud matter element coupled model [J]. China Rural Water and Hydropower,2014(7):101-103. (in Chinese))
- [11] 周启刚,张晓媛,王兆林. 基于正态云模型的三峡库区土地利用生态风险评价[J]. 农业工程学报,2014,30(23):289-297. (ZHOU Qigang, ZHANG Xiaoyuan, WANG Zhaolin. Land use ecological risk evaluation in Three Gorges Reservoir area based on normal cloud model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2014,30(23):289-297. (in Chinese))
- [12] WANG D, LIU D F, DING H, et al. A cloud model-based approach for water quality assessment[J]. Environmental Research,016,148:24-35.
- [13] 丁昊,王栋. 基于云模型的水体富营养化程度评价方法[J]. 环境科学学报,2013,33(1):251-257. (DING Hao, WANG Dong. The evaluation method of water eutrophication based on cloud model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2013,33(1):251-257. (in Chinese))
- [14] ZHA X C, HUANG C C, PANG J L, et al. Reconstructing the palaeoflood events from slackwater deposits in the upper reaches of Hanjiang River, China [J]. Quaternary International,2015,380/381:358-367.
- [15] 曹丽娟,董文杰,张勇. 未来气候变化对黄河和长江流域极端径流影响的预估研究[J]. 大气科学,2013,37(3):634-644. (CAO Lijuan, DONG Wenjie, ZHANG Yong. Estimation of the effect of climate change on extreme stream flow over the Yellow River and Yangtze River basins [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2013,37(3):634-644. (in Chinese))
- [16] 周亮,黄春长,周亚利,等. 汉江上游安康东段古洪水事件光释光测年研究[J]. 地质学报,2013,87(11):1703-1714. (ZHOU Liang, HUANG Chunchang, ZHOU Yali, et al. OSL dating of the palaeoflood events in the Ankang east reach in the upper reaches of Hanjiang River Valley [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87 (11): 1703-1714. (in Chinese))
- [17] 卢修富. 安康市水文特性[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(4):154-157. (LU Xiufu. Hydrological characteristics in Ankang City [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2009,20(4):154-157. (in Chinese))
- [18] 殷淑燕,王海燕,黄春长,等. 陕南汉江上游历史洪水灾害与气候变化[J]. 干旱区研究,2010,27(4):522-528. (YIN Shuyan, WANG Haiyan, HUANG Chunchang. Study on historical flood disasters and climate change in the upper reaches of the Hanjiang River [J]. Arid Zone Research,2010,27(4):522-528. (in Chinese))
- [19] 陕西省统计局. 陕西省地市县历史统计资料汇编1949—1990[M]. 北京:中国统计出版社,1991.
- [20] 安康市统计局. 安康统计年鉴2011[M]. 北京:中国统计出版社,2012.
- [21] 李德毅,杜鹤. 不确定性人工智能[J]. 软件学报,2004,15(11):1583-1594. (LI Deyi, DU Gu. Artificial intelligence with uncertainty [J]. Journal of Software. 2004,15(11):1583-1594. (in Chinese))
- [22] LI D Y. Knowledge representation in KDD based on linguistic atoms [J]. Journal of Computer Science and Technology,1997,12(6):481-496.
- [23] 李德毅,邸凯昌,李德仁. 用语言云模型挖掘关联规则[J]. 软件学报,2000,11(2):143-158. (LI Deyi, DI Kaichang, LI Deren. Mining association rules with linguistic cloud models [J]. Journal of Software. 2000,11(2):143-158. (in Chinese))
- [24] 王威,田杰,马东辉,等. 基于云模型的城市防震减灾能力综合评估方法[J]. 北京工业大学学报,2010,36(6):764-770. (WANG Wei, TIAN Jie, MA Donghui, et al. Comprehensive evaluation for cities' ability of reducing earthquake disasters based on cloud model [J]. Journal of Beijing University of Technology,2010,36(6):764-770. (in Chinese))
- [25] LI D Y, HAN J W, SHI X M. Knowledge representation and discovery based on linguistic atoms [J]. Knowledge-Based Systems,1998(10):431-440.
- [26] 李德毅,刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学,2004,6(8):28-34. (LI Deyi, LIU Changyu. Study on the universality of the normal cloud model [J]. Engineering Science,2004,6(8):28-34. (in Chinese))

(下转第48页)

- Yongjian, et al. Eutrophic investigation and assessment on backwater reaches of several typical branches of Three Gorges Reservoir at 135 m water level [J]. Environmental Monitoring in China, 2005, 21(2): 88-89. (in Chinese))
- [18] 童思陈, 许光祥, 文传平. 三峡库区支流航道技术等级定级及其应用[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009, 28(6): 1112-1117. (TONG Sichen, XU Guangxiang, WEN Chuanping. Preliminary study and its application of navigation grading standard planning of the tributary channel in TGP Reservoir area [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2009, 28(6): 1112-1117. (in Chinese))
- [19] 刘玉洁, 尹真真. 三峡水库支流回水区富营养化时空分布特征[J]. 环境保护科学, 2014, 40(2): 30-34. (LIU Yujie, YIN Zhenzhen. Space-time distribution of eutrophication in backwater zones of branch rivers in Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Protection Science, 2014, 40(2): 30-34. (in Chinese))
- [20] 闫涛, 陈立, 徐敏, 等. 库区交汇河段水动力特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 60-65. (YAN Tao, CHEN Li, XU Min, et al. Experimental study of hydrodynamic characteristics at confluence reach in reservoir area [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(1): 60-65. (in Chinese))
- [21] 解云海, 张金良, 郝振纯, 等. 水库异重流研究综述[J]. 人民黄河, 2008, 30(5): 28-31. (XIE Hehai, ZHANG Jinliang, HAO Zhengchun, et al. Summary of research on density current in reservoir [J]. Yellow River, 2008, 30(5): 28-31. (in Chinese))
- [22] 姚志坚, 张小峰, 陆俊卿. 温度分层环境下的水库异重流试验研究[J]. 人民长江, 2011, 42(13): 51-55. (YAO Zhijian, ZHANG Xiaofeng, LU Junqing. Laboratory investigation on density currents in temperature stratified reservoirs [J]. Yangtze River, 2011, 42(13): 51-55. (in Chinese))
- [23] 周子然, 邓兵, 王雨春, 等. 三峡库区干支流水体交换特征初步研究: 以朱衣河为例[J]. 人民长江, 2015, 46(22): 1-6. (ZHOU Ziran, DENG Bing, WANG Yuchun, et al. Preliminary study on characteristics of water exchange between mainstream and tributaries in Three Gorges Reservoir area: case of Zhuyi River [J]. Yangtze River, 2015, 46(22): 1-6. (in Chinese))
- [24] 熊超军. 三峡水库大宁河库湾分层异重流及其水环境效应研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2013.
- [25] 操满, 傅家楠, 周子然, 等. 三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换: 以梅溪河为例[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1293-1300. (CAO Man, FU Jianan, ZHOU Ziran, et al. Nutrient exchange between Meixi River and Yangtze River due to the typical interaction process of the Three Gorges Reservoir and its tributary [J]. Environmental Science, 2015, 36(4): 1293-1300. (in Chinese))
- [26] 罗光富. 梅溪河口水动力作用对三峡库区干支流营养盐交换的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
(收稿日期: 2016-02-22 编辑: 郑孝宇)

(上接第 34 页)

- [27] 史培军. 四论灾害系统研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(6): 1-7. (SHI Peijun. Theory and practice on disaster system research in a fourth time [J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(6): 1-7. (in Chinese))
- [28] 王兆礼, 赖成光, 陈晓宏. 基于熵权的洪灾风险空间模糊综合评价模型[J]. 水力发电学报, 2012, 21(5): 35-40. (WANG Zhaoli, LAI Chengguang, Chen Xiaohong. Spatially fuzzy comprehensive assessment model for flood hazard risk based on entropy weight [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 21(5): 35-40. (in Chinese))
- [29] 龚艳冰, 张继国. 基于正态云模型和熵权的人口发展现代化程度综合评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(1): 138-143. (GONG Yanbing, ZHANG Jiguo. Comprehensive assessment on population development degree of modernization based on normal cloud model and entropy weight [J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(1): 138-143. (in Chinese))
- [30] 孙鸿鹄, 程先富, 倪玲, 等. 基于云模型和熵权法的巢湖流域防洪减灾能力评估[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 222-227. (SUN Honghu, CHENG Xianfu, NI Ling, et al. Capacity evaluation of flood disaster prevention and reduction in Chaohu Basin based on cloud model and entropy weight method [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(1): 222-227. (in Chinese))
- [31] 安康市地方志编纂委员会. 安康县志[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1989.
- [32] 汉阴县志编纂委员会. 汉阴县志[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1989.
- [33] 石泉县志编纂委员会. 石泉县志[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1990.
- [34] 白河县地方志编纂委员会. 白河县志[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1996.
- [35] 旬阳县地方志编纂委员会. 旬阳县志[M]. 北京: 中国和平出版社, 1996.
(收稿日期: 2016-07-06 编辑: 郑孝宇)