

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.03.037

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

陈鹏, 孙滢悦, 张立峰, 刘家福, 社会石

(吉林师范大学 旅游与地理科学学院, 吉林 四平 136000)

摘要: 准确掌握洪水灾害风险的时空演变规律对城市防灾布局具有重要意义。利用集成化洪水灾害风险指数对哈尔滨市洪水灾害风险进行了评价, 并利用马尔科夫链对洪水灾害风险的时空变化进行了分析。研究发现, 2000年-2010年哈尔滨市高风险区面积逐渐增加, 较高风险区和中等风险区面积逐渐减少, 低风险区和较低风险区面积逐渐增加, 但变化较小。十年来整个市区内洪水灾害风险的高风险逐渐增加, 整体风险呈增加趋势, 但局部变化不一。各等级风险之间, 中等风险和高风险转换较活跃, 低风险和较低风险之间转换较稳定, 而其它风险区与高风险之间转换最为活跃。

关键词: 城市洪水灾害; 马尔科夫链; 时空演变; 风险转换; 哈尔滨

中图分类号: TV 122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 1683(2014) 03-0170-06

Research on Risk Assessment and Spatio-Temporal Variation of Urban Flood Disaster Based on GIS — a case study in Harbin

CHEN Peng, SUN Ying yue, ZHANG Li feng, LIU Jia fu, DU Hui shi

(College of Travel and Geographical Sciences, Jilin Normal University, Siping 136000, China)

Abstract: Accurate knowledge of the spatial and temporal variations of flood disaster risk is of important significance for determining layout of urban disaster prevention. In this study, integrated flood risk index was used to evaluate the flood disaster risk in Harbin, and Markov Chain was used to analyze the spatial and temporal variations of flood disaster risk. The results showed that (1) the area with very high flood risk in Harbin has increased, the area with relative high and moderate flood risks has decreased, and the area with low flood risk has increased from 2000 to 2010; (2) the high level of flood disaster risk has increased gradually in the ten years, and the overall risk has increased but with different local variations; and (3) the interchange between middle risk level and high risk level is frequent, while the interchange between low risk level and lower risk level is relatively stable. Moreover, the interchange between high risk level and other risk levels are very active.

Key words: urban flood risk; Markov chain; spatio-temporal variation; risk change; Harbin

城市是一个以人为主体的, 以空间利用为特点, 以聚集经济效益为目的的一个集约人口、经济和科学文化的空间地域系统^[1]。然而, 由于其特殊的人口和财富的高度集中, 社会问题的复杂性和基础设施的脆弱性, 无时无刻不面临着突发事件的挑战。近年来, 洪水灾害发生频繁, 对城市未来可持续发展及城市居民的生命、财产等造成严重的阻碍与威胁。

关于洪水灾害风险的研究, 国外从 20 世纪 60 年代就已经开始, 但最初只是利用历史资料对洪灾的强度、重现期及其带来的影响进行描述; 到 80 年代美国和日本开始利用有

限的洪水灾害因子进行风险评价^[2]; 21 世纪初, 苏格兰根据洪水研究报告(NERC, 1975)建立了标准风险评估流程。而国内具有代表性的是中国水利水电科学研究院制定的洪水风险评价技术体系与方法^[3-5]。

目前洪水灾害风险评价研究的内容主要包括: 洪水的强频分析; 洪灾风险图的编制; 洪水风险损失计算。黄崇福等^[6]用模糊集字段定义城市灾害的可能性风险, 提出了城市风险评价的一级和二级模型; 黄诗峰^[7]等基于历史灾情数

收稿日期: 2013-12-13 修回日期: 2014-04-22 网络出版时间: 2014-05-08

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.03.036.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41371495); 吉林师范大学博士基金项目(20131110); 吉林省教育厅社科项目(2013153); 吉林省自然科学基金项目(201215224); 四平市社会科学基金项目(201118)

作者简介: 陈鹏(1980-), 男, 吉林四平人, 讲师, 博士, 从事自然灾害风险评价与管理研究。E-mail: pp11290@163.com

据,用 P-0 型曲线来拟合洪灾损失频率分布,用加速遗传算法进行参数估计的洪水灾害风险评价方法;周成虎等^[8]基于 GIS 进行了洪水灾害风险区划研究;张继权^[9,10]利用气象因子、自然社会经济因子、历史灾情数据等对日本山口县由暴雨引发的洪水灾害进行了评价和区划,并提出洪水灾害风险是危险性、暴露性、脆弱性和防灾减灾能力共同作用的结果;蒋卫国^[11]利用马尔科夫链对区域洪水灾害风险格局演变进行了研究。综上,虽然国内外对于洪灾风险研究较多,但仍缺少对城市洪灾综合指数、城市洪灾风险时空演变、风险等级之间转换规律的研究。本文将在计算哈尔滨市 2000 年-2010 年的洪水灾害风险等级及其风险指数的基础上,利用马尔科夫链数学模型,分析哈尔滨市洪灾风险从时间和空间上的演变规律。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

哈尔滨市位于东经 128° 42' - 130° 10', 北纬 44° 04' - 46° 40', 是黑龙江省省会,中国东北北部的政治、经济、文化和交通中心,东北北部地区最大的中心城市,也是中国省辖市中管辖面积最大、管辖总人口居第二位的特大城市(仅次于成都),是中国十大城市之一。市区土地面积 7 086 km², 人口 587.9 万人。由于受东南季风气流影响 6 月- 8 月降雨较多,易发洪涝灾害,历史上较大的一次洪灾为 1932 年,造成几十万人受灾。

1.2 数据来源

本文数据来源为哈尔滨市 2000 年- 2010 年统计年鉴^[12], 部分数据来源于黑龙江省气象局统计资料, 矢量、属性数据来源于哈尔滨市城乡规划设计院。数据长度为 11 年。

2 研究方法

2.1 自然灾害风险指数法

自然灾害风险指未来若干年内可能达到的灾害程度及其发生的可能性。一般而言,自然灾害风险是危险性、暴露性、脆弱性及防灾减灾能力(四大因子)相互综合作用的结果^[13,14], 因此自然灾害风险数学表达式为:

$$\text{自然灾害风险度} = \text{危险性}(H) \times \text{暴露性}(E) \times \text{脆弱性}(V) \times \text{防灾减灾能力}(R) \quad (1)$$

2.2 熵权法

熵权法是多指标综合评价的一种重要方法,它根据指标数据提供的信息量对指标进行主观权重的客观化表述方法,以减少主观因素的影响^[15,16]。用熵权法进行综合评价的基本步骤如下。

首先,将各指标同度量化,计算第 j 项指标下第 i 个方案指标值的比重。

$$p_{ij} = u_{ij} / \sum_{i=1}^m u_{ij} \quad (2)$$

其次,第 j 项指标的熵值 e_j :

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (3)$$

式中:常数 k 与系统的样本数 m 有关,此时令 $k = 1/\ln m$, 则 $0 \leq e_j \leq 1$ 。

最后,计算指标的效用值 $d_j = 1 - e_j$, d_j 越大,该指标价值越大,其权重也就越大,第 j 项指标权重:

$$w_j = d_j / \sum_{j=1}^n d_j \quad (4)$$

2.3 加权综合法

加权综合法^[17,18] (WCA) 是假设由于指标 i 量化值的不同,而使每个指标 i 对于特定因子 j 的影响程度存在差别,公式为:

$$C_{ij} = \sum_{i=1}^m Q_{vij} W_{ci} \quad (5)$$

式中: C_{ij} 是评价因子的总值, Q_{vij} 是因子 j 的指标 i ($Q_{vij} \geq 0$), W_{ci} 是指标 i 的权重值 ($0 \leq W_{ci} \leq 1$), 通过熵权法计算得出, m 是评价指标个数。

2.4 风险等级比较法

景观动态度可用于定量描述洪灾风险等级区的变化速度。景观动态度又可分为单一景观和综合景观动态度, 本文利用单一景观动态度表征研究区某一时刻范围内单一风险等级区的变化速度,用综合景观动态度来表征研究区整体变化速度^[19,20], 公式为:

$$L = \frac{U_a - U_b}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (6)$$

$$CL = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta L U_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n U_i} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (7)$$

式中: L 为研究时段内某风险等级区的年变化率; U_a 、 U_b 为研究期初和研究期末的某风险等级区的面积; T 为研究时段长度,单位为年; CL 为研究时段内各风险的综合动态度; U_i 为研究期初 i 类风险等级区的面积; $\Delta L U_{i-j}$ 为研究时段内 i 类风险等级区转化为非 i 类风险等级区的面积。

2.5 马尔科夫过程

在事件的发展过程中,若每次状态的转移都仅与前一时刻的状态有关,而与过去的状态无关,或者说状态转移过程是无后效性的,则这样的状态转移过程就称为马尔科夫过程。某一种状态出发在下一时刻转移到其它状态的可能性,称为状态转移概率。由状态 E_i 转为状态 E_j 的状态转移概率 $P(E_i \rightarrow E_j)$ 是:

$$P(E_i \rightarrow E_j) = P(E_j/E_i) = P_{ij} \quad (8)$$

利用马尔科夫链的全体转移概率构成转移概率矩阵,可以描述洪水灾害风险在时间和空间的演变过程。如果把所有可能状态分别记为 E_1, E_2, E_3, \dots , 把其发生转移的时间记为 t_1, t_2, t_3, \dots , 用 P_{ij} 表示系统由状态经过一次转移到达状态的概率。那么转移概率排列成矩阵:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nm} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\text{其中: } p_{ij} = \frac{C_{i-j}}{L U_i} \quad (10)$$

式中: n 为风险等级数目; p_{ij} 为洪水灾害风险初期(2000 年)至洪水灾害风险末期(2010 年)风险等级 i 转化为 j 的概率; C_{i-j} 为风险等级初期(2000 年)至末期(2010 年)相互转换的

面积; U_i 为期初(2000 年)第 i 类风险等级的面积。

2.6 风险等级矩阵置换

为了更好地揭示城市洪水灾害风险空间型演化过程,可采用各状态间相互置换—不可置换的连通率衡量各状态在演化过程中的活跃性或稳定性。即利用动态结构根据转移概率矩阵进行状态间的可置换性分析,如果有两个状态后面跟随着同一状态,则认为此两个状态之间彼此存在着可置换性^[21],两者具有相似的演化趋势,置换系统实质上就是相似系数。置换矩阵通过计算一阶转移矩阵的行向量之间的相似系数获得。公式为:

$$L_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m p_{ik} \cdot p_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m p_{ik}^2 \cdot \sum_{k=1}^m p_{jk}^2}} \quad (11)$$

式中: p_{ik}, p_{jk} 分别表示由状态 i 和 j 转移到状态 k 的概率。 $0 \leq L_{ij} \leq 1$, L_{ij} 越接近 1, 状态 i 和 j 在序列中地位的相似性愈高; L_{ij} 愈接近于 0, 表明这两个状态的动态变化极不相似。据此,可认为是状态 i 和 j 动态变化相似性程度的判定指标^[21]。

2.7 风险指数比较法

风险指数法主要是利用 ARCGIS 中地图代数运算,将研究区末期的洪水灾害风险图层与研究初期洪水灾害风险图层进行转移运算,得到研究区研究时段内的风险指数变化情况。其中洪水灾害风险指数为正的表示研究区洪水灾害风险增高,为负的表示洪水灾害风险减少。

3 哈尔滨市洪灾风险评价

3.1 洪灾风险评价指标体系

根据前文有关自然灾害四大因子内容,本文选取洪灾危险性、暴露性、脆弱性、防灾减灾能力作为评价因子。按洪灾发生的特点,选取 10 个副因子及 18 个指标,指标数据通过面平均方法依次匹配到公里网中。各指标采用归一化处理,并利用熵权法确定各因子权重,具体评价指标与权重见表 1。

表 1 洪灾风险指标体系及权重

Table 1 Index system and weight of flood disaster risk

因子	副因子	指标	权重
危险性 (H)	降雨	X_{H1} 降雨频率	0.40
		X_{H2} 坡度	0.18
	地形	X_{H3} 坡向	0.21
		X_{H4} 高程	0.28
	河网	X_{H5} 排水能力	0.15
暴露性 (E)	人口暴露	X_{E1} 居民数量	0.38
		X_{E2} 人口密度	0.34
	经济暴露	X_{E3} 农林牧副渔总产量	0.14
		X_{E4} 工业总产值	0.06
脆弱性 (V)	人口脆弱	X_{V1} 0~15 岁和大于 60 岁人口数量	0.45
		X_{V2} 受教育程度	0.28
	经济脆弱	X_{V3} 小企业数量	0.12
		X_{V4} 受灾面积	0.10
防灾 减灾 能力 (R)	疏散避难	X_{R1} 避难所数量	0.38
		X_{R2} 医院床位数	0.19
	资源量	X_{R3} 救灾物资储备量	0.45
		X_{R4} 防洪资金投入	0.26
	交通条件	X_{R5} 避难通道疏散能力	0.23

3.2 洪灾风险评价模型构建

根据公式(1),利用加权综合法和熵权法,可建立如下洪灾风险指数模型^[9-10]:

$$F_{FDR} = (H^{WH})(E^{WE})(V^{WV})(0.1(1-a)R+a) \quad (12)$$

$$H = W_{H1}X_{H1} + W_{H2}X_{H2} + W_{H3}X_{H3} + W_{H4}X_{H4} + W_{H5}X_{H5} \quad (13)$$

$$E = W_{E1}X_{E1} + W_{E2}X_{E2} + W_{E3}X_{E3} + W_{E4}X_{E4} \quad (14)$$

$$V = W_{V1}X_{V1} + W_{V2}X_{V2} + W_{V3}X_{V3} + W_{V4}X_{V4} \quad (15)$$

$$R = W_{R1}X_{R1} + W_{R2}X_{R2} + W_{R3}X_{R3} + W_{R4}X_{R4} \quad (16)$$

式中: F_{FDR} 是洪灾风险指数,表示洪灾风险程度,其值越大,则洪灾风险程度越大; $W_{H_i}, W_{E_i}, W_{V_i}, W_{R_i}$ 分别表示其危险性、暴露性、脆弱性和防灾减灾能力的权重值,而 $H(x), E(x), V(x), R(x)$ 分别代表了危险性、暴露性、脆弱性和防灾减灾能力的大小。 $X_{H_i}, X_{E_i}, X_{V_i}, X_{R_i}$ 为各指标量化后的值。以上模型对洪灾风险进行评价时,把洪水风险等级分为五级,分别为低风险、较低风险、中等风险、较高风险和高风险。

4 城市洪灾时空演变研究

4.1 风险等级演变

利用 ARCGIS 中的地图代数功能对研究区内各风险等级面积汇总,得到哈尔滨市洪水灾害风险转移面积数据(见表 2)。并由表 2 的计算结果得到研究区风险动态度(见表 3)和研究区洪水灾害风险转移概率矩阵(公式 9)。

表 2 2000 年—2010 年哈尔滨市洪水灾害风险转移面积

Table 2 Flood risk transfer areas of Harbin between 2000 and 2010

风险等级	km ²				
	低风险区	较低风险区	中等风险区	较高风险区	高风险区
低风险区	222	984	64	0	0
较低风险区	925	437	172	140	0
中等风险区	375	405	581	40	0
较高风险区	0	167	114	129	38
高风险区	0	30	0	180	280

$$P_{\text{转移概率}} = \begin{bmatrix} 0.63 & 0.3 & 0.02 & 0 & 0 \\ 0.56 & 0.26 & 0.1 & 0.08 & 0 \\ 0.27 & 0.29 & 0.41 & 0.03 & 0 \\ 0 & 0.37 & 0.26 & 0.29 & 0.08 \\ 0 & 0.06 & 0 & 0.36 & 0.58 \end{bmatrix} \quad (17)$$

表 3 2000 年—2010 年哈尔滨市面积变化及风险动态度

Table 3 Variable areas and risk dynamic degrees of Harbin between 2000 and 2010

风险等级	2000 年面积 /km ²	2010 年面积 /km ²	面积变化 /km ²	动态度 (%)
低风险区	3 268	3 520	252	0.65
较低风险区	1 674	1 996	322	1.47
中等风险区	1 401	931	- 470	- 4.59
较高风险区	448	327	- 121	- 3.36
高风险区	490	660	170	2.34

从表 3 可以看出,2000 年—2010 年,哈尔滨市洪水灾害较低风险区、低风险区和高风险区面积增加较明显,而其它

风险区均有所减少。2000 年低风险区面积占研究区面积的 46.1%，较低风险区面积占 23.6%，中等风险区面积占 19.8%，较高风险区占 6.3%，高风险区占 6.9%；2010 年低风险区面积占研究区面积的 49.7%，较低风险区面积占 28.2%，中等风险区面积占 13.1%，较高风险区占 4.6%，高风险区占 9.3%。

从洪水风险动态度来看，高风险区面积在研究时段内其动态度变化速度最快，其它风险区等级动态度变化速度较小。

从整体变化趋势来看研究区西部从低风险区变化为中等风险区、高风险区，中部地区从低风险区转移成中等风险区、较高风险区、高等风险区，南部和北部大致是由低等风险区向较低风险区、中等风险区、高等风险区。由此可见，整体风险转移变化是由四周向中心转移的趋势未来随着城市的发展，承灾体数量不断增加，必然导致城市洪水灾害风险逐渐加大。

4.2 风险指数演变分析

2000 年-2010 年研究区内洪水灾害风险指数在 0.441~1.656 之间(图 1)，通过研究末期与研究初期的洪水灾害风险指数图层进行风险转移运算，得到研究时段内哈尔滨市区相邻年之间的风险指数变化图层(图 2)，结果显示，相邻年之间大部分区域的洪水灾害风险指数变化微弱区，洪水灾害风险指数强减少区和强增加区面积较小。

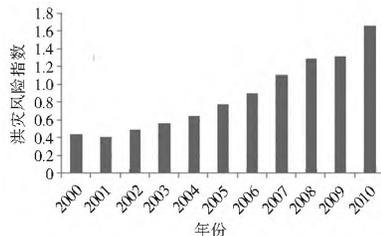


图 1 2000 年-2010 年哈尔滨市洪灾风险指数变化
Fig. 1 Variation of flood risk index in Harbin from 2000 to 2010

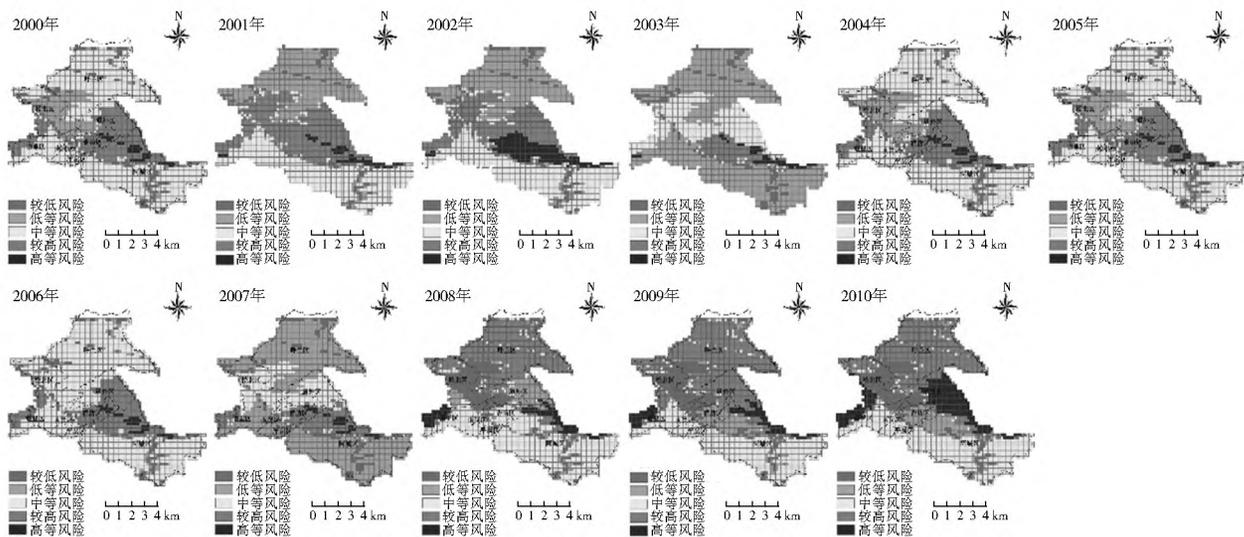


图 2 2000 年-2010 年哈尔滨市区洪水灾害风险指数变化情况
Fig. 2 Map showing the variation of flood risk index in Harbin from 2000 to 2010

4.3 风险等级矩阵置换分析

根据公式(17)得到研究区内风险等级置换矩阵，计算出置换系数(见表 4)。置换系数说明两种状态的相似程度，其大小与转移概率大小无关，对相似系数进行统计检验后对各状态进行分类^[23]。因为 $R(0.1-5) = 0.415$ ，因此当 $L_{ij} \geq 0.451$ ， i 和 j 之间存在显著的可置换性；反之则不可置换性显著。从表 3 可以看出，风险等级 1(低风险)和风险等级 2(较低风险)之间、风险等级 1 和风险等级 3 之间、风险等级 2 和风险等级 3(中等风险)之间、风险等级 2 和风险等级 4 之

间、风险等级 3 和风险等级 4 之间、风险等级 4(较高风险)和风险等级 5 之间置换性显著；风险等级 1 和风险等级 4 之间、风险等级 1 和风险等级 5(高等风险)之间、风险等级 2 和风险等级 5 之间、风险等级 3 和风险等级 5 之间不可置换性显著。

为了更好地了解洪水灾害风险各等级间的变化情况，本文引入连通率来表征各风险等级间的相互转移的概率，连通率是指一种状态现有的连通数和该状态应有的连通数 4 的比值。

表 4 哈尔滨市区洪水灾害风险各等级之间置换系数

Table 4 Replacement coefficients between different levels of flood disaster risks in Harbin

	1	2	3	4	5
1	1.000	0.983	0.656	0.288	0.041
2		1.000	0.75	0.425	0.103
3			1.000	0.718	0.072
4				1.000	0.465
5					1.000

表 5 哈尔滨市区洪水灾害风险各等级间置换关系连通性

Table 5 Replacement connectivities between different levels of flood disaster risks in Harbin

关系类型	连通指标	状态				
		1	2	3	4	5
可置换	连通数	2	3	3	3	1
	连通率	0.5	0.6	0.6	0.6	0.25
不可置换	连通数	2	1	1	1	3
	连通率	0.5	0.25	0.25	0.25	0.6

通过计算(表 5)可知:状态 2、3、4(低风险、中等风险、较高风险)的活跃性最强,这三种风险等级较容易转换为其它类型风险,而状态 5(高风险)则处于不活跃状态;状态 1(低风险)则居于二者之间。状态 5 不活跃的主要原因是城市中洪水灾害的驱动因素越来越多,其它风险等级转换为高风险的现象日趋增加。图 3 表示出哈尔滨市洪灾空间型各状态间置换关系的连通性。在今后的防洪工作中需要在西部和中部区域加强防洪工程及非工程措施,尤其是在高风险区域及即将转化成高风险区域都是重点的保护对象。

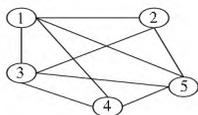


图 3 哈尔滨市洪灾风险显著性空间置换关系的连通性

Fig. 3 Connectivity of spatial displacement between different levels of flood disaster risks in harbin

5 结论

本文利用自然灾害风险理论,针对哈尔滨市洪水灾害风险进行评价,同时利用马尔科夫链对哈尔滨洪水灾害风险时空演变进行研究,得出以下认识。

(1) 2000 年-2010 年,哈尔滨市洪水灾害风险可以分为三个演化阶段:2000 年-2004 年,是哈尔滨市不同等级洪灾风险变化相对较大的年份,风险等级又周边向中心转移;2005 年-2008 年,风险中心除了继续向中心转移外,其它区域风险等级都由低等向高一等风险转移的趋势;2009 年-2010 年,风险等级变化基本不大,在各洪灾风险等级范围内及相邻区域进行较小范围转移,并没有大范围的洪灾风险转移。

(2) 在空间上,2000 年-2010 年区域洪灾风险指数变化不大,强减少区和强增加区面积均较小,变化较大区域主要为南岗区 and 呼兰区,其原因主要是南岗区和呼兰区内河网密度大,承灾体较多,人口较密集。

(3) 洪水灾害风险的总体演变特征是:低风险区、较低风险区、中等风险区呈活跃趋势,易转换成较高和高风险区;较高和高风险区处于相对稳定状态,不易转换成其它风险区。

由于城市洪水灾害风险的时空演变是一个非常复杂的过程,其中受人为因素和自然因素影响较大,其中更详细的驱动机制和因果关系,还需要进一步进行研究。

参考文献(References):

[1] 王迎春,郑大玮,李青春.城市气象灾害[M].北京:气象出版社,2009.(WANG Ying chun,ZHEMENG Da wei,LI Qing chun. Urban Meteorological Disasters[M]. Peking: Meteorological press. Meteorological Press, 2009. (in Chinese))

[2] 魏一鸣.洪水灾害风险管理理论[M].北京:科学出版社,2002.(WEI Yi ming. The Theory of Flood Disaster Risk Management[M]. Beijing, Science Press, 2002. (in Chinese))

[3] 王艳艳,韩松,喻朝庆,等.太湖流域未来洪水风险及土地风险管理减灾效益评估[J].水利学报,2011,44(3):327-334.(WANG Yarran, HAN Song, YU Chaorqing, HU Changwei. The Flood Risk and Flood Alleviation Benefit of Land Use Management in Taihu Basin[J]Journal of Hydraulic engineer

ing, 2011, 44(3): 327-334. (in Chinese))

- [4] 李娜,向立云,程晓陶.国外洪水风险图制作比较及对我国洪水风险图制作的建议[J].水利发展研究,2005,6:28-31.(LI Na, XIANG Li yun, CHENG Xiao tao. The Flood Risk Map Manufactured Abroad Comparison and to Make China's Flood Risk Map Advice[J]. Research on The Development of Water Conservancy. 2005, 6: 28-31. (in Chinese))
- [5] 程晓陶.我国洪水风险分析与区划的进展[EB/OL].http://www.hwcc.com.cn/topic/topicmon.e.asp classID=909,2001-8-23.(CHENG Xiao tao. Progress in The analysis and regionalization of Flood Risk in our Country[EB/OL].http://www.hwcc.com.cn/topic/topicmon.e.asp classID=909,2001-8-23. (in Chinese))
- [6] 黄崇福,史培军.城市地震灾害风险评价的数学模型[J].自然灾害学报,1995,4(2):30-37.(HUANG Cong fu SHI Pei jun. Mathem Atical model of Risk Assessment of Earthquake Disaster in City[J]. Journal of Natural Disasters, 1995, 4(2): 30-37. (in Chinese))
- [7] 黄诗峰.洪水灾害风险分析的理论与方法研究[D].中国科学院地理研究所博士论文,1999.(HUANG Shi feng. Study on The Theory And Method of Flood Disaster Risk Analysis[J]. The Chinese Academy of Sciences Institute of Geography, 1999. (in Chinese))
- [8] 周成虎,万庆,黄诗峰.基于GIS的洪水灾害风险区划研究[J].地理科学,2000,55(1):15-24.(ZHOU Cheng hu, Wan Qing, HUANG Shi feng. A GIS base Approach to Flood Risk Zonation[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(1): 15-24. (in Chinese))
- [9] 张继权,李宁.主要气象灾害风险评价与管理的数量化方法及其应用[M].北京:北京师范大学出版社,2007:72-73.(ZHANG Ji quan, LI Ning. Quantitative Methods and Application of Risk Assessment and Management on Main Meteorological Disasters[M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 2007: 72-73. (in Chinese))
- [10] ZHANG Ji quan, Okada Norio, Tatano Hirokazu, Hayakawa Seiji. Risk Assessment and Zoning of Flood Damage Caused by Heavy Rainfall in Yamaguchi Prefecture, Japan[A]. Wu et al Flood Defence 2002[M]. New York: Science Press, 2002. 162-170.
- [11] 蒋卫国,盛绍学,朱晓华,等.区域洪水灾害风险格局演变分析—以马来西亚吉兰丹州为例[J].地理研究,2008,3(27):503-507.(JIANG Wei guo, SHENG Shaor xue, ZHU Xiaohua. Change and Spatial Pattern of Flood Disaster Risk[J]. GEOGRAPHICAL RESEARCH, 2008(27): 503-507. (in Chinese))
- [12] 黑龙江省统计局.黑龙江统计年鉴2000、2010[M].黑龙江:中国统计出版社,(Heilongjiang Province Statistical Bureau. Heilongjiang Statistical Yearbook 2000、2010[M]. Heilongjiang: China statistical publishing house. (in Chinese))
- [13] Zhang Jiquan. Risk Assessment of Drought disaster in The Maizegrow in Gregion of Songliao Plain, China[J]. Agriculture Ecosystems Environment, 2004, 102(2): 133-153.
- [14] 张继权,赵万智,冈田宪夫,多多纳裕一.综合自然灾害风险管理的理论、对策与途径[J].应用基础与工程科学学报,2004(增刊),263-271.(ZHANG Ji quan, ZHAO War zhi, TATA-

- NO Hirokazu. Comprehensive risk Management of Natural Disasters[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2004, 26(3): 263-271. (in Chinese)
- [15] 邱蕊华. 管理决策与应用熵学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. (QIU Guir hua. Management Decision making and Application of Entropy Study[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2002. (in Chinese))
- [16] 邱东. 多指标综合评价方法的系统分析[M]. 北京: 中国统计出版社, 2003. (QIU Dong. Multindex Synthetic Evaluation Method of System Analysis[M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2003. (in Chinese))
- [17] 张超, 万庆, 张继权. 于格网数据的洪水灾害风险评估方法——以日本新川洪灾为例[J]. 地球信息科学, 2003, 4(4): 70-72. (ZHANG Chao, WAN Qing, ZHANG Jiqian. The Method of Flood Disaster Risk Evaluation Based Upon Data of Grid Square [J]. Geo Information Science, 2003, 4(4): 70-72. (in Chinese))
- [18] Zhang Jiqian, Okada Norio, Tatano Hirokazu, Hayakawa Seiji. Damage Evaluation and Regionalization of Agrometeorological Disasters in The maizegrowing region of Songliao Plain, China: case study of Lishu Area of Jilin Province[J]. Natural Hazards, 31(1): 209-232.
- [19] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展, 1999, 18(1): 81-87. (WAN Xiulan BAO Yuhai. Study On The Methods of Land Use Dynamic Change Research[J]. Progress in Geography, 1999, 18(1): 81-87. (in Chinese))
- [20] 王良健, 包浩生, 彭补拙. 基于遥感与 GIS 的区域土地利用变化的动态监测与预测研究[J]. 经济地理, 2000, 20(2): 47-50. (WANG Lingjian, BAO Haosheng, PENG Buzhuo. The Dynamic Monitoring And Prediction of The Regional Land Use Change Based on Rs And GIS[J]. Economic Geography, 2000, 20(2): 47-50. (in Chinese))
- [21] 陈育峰. 我国旱涝空间型的马尔科夫概型分析[J]. 自然灾害学报, 1995, 4(2): 66-72. (CHEN Yufeng. Analysis On Spatial Types of Flood/Drought Disasters In China[J]. Journal of Natural Disasters, 1995, 4(2): 66-72. (in Chinese))
- [22] 罗积玉, 邢英. 经济统计分析方法及预测[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987: 335-336. (LUO Jiyu, XING Ying. Economic statistical methods of analysis and prediction[M]. Peking: Tsinghua University Press, 1987: 335-336. (in Chinese))
- [23] 刘吉平, 吕宪国, 吴正方. 吉林省旱涝灾害地域组合规律的动态变化[J]. 中国农业气象, 2004, 2(25): 5-7. (LIU Jiping, LYU Xianguo, WU Zhengfang. Dynamic Change of Regional Combination Law of Drought and Flood Disasters in Jilin Province [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2004, 2(25): 5-7. (in Chinese))

(上接第 94 页)

- [5] 闵健. 搅拌槽内宏观及微观混合的实验研究与数值模拟[D]. 北京: 北京化工大学, 2005. (MIN Jian. Experimental Study and Numerical Simulation of Micromixing and Micromixing in Stirred Tanks[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2005. (in Chinese))
- [6] 张国娟, 闵健. 涡轮桨搅拌槽内混合过程的数值模拟[J]. 北京化工大学学报, 2004, 31(6): 24-27. (ZHANG Guojuan, MIN Jian. Numerical Simulation of Mixing Process in a Stirred Tank with Rushton Turbine[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2004, 31(6): 24-27. (in Chinese))
- [7] 王展, 尹应武. 一种新型轴流搅拌桨的开发[J]. 化工装备技术, 2004, 25(1): 1-4. (WANG Zhan, YIN Yingwu. Develop of a New Kind of Axialflow Stirrer[J]. Chemical Equipment Technology, 2004, 25(1): 1-4. (in Chinese))
- [8] 李志鹏. CBY 搅拌桨叶的数值分析[D]. 北京: 北京化工大学, 2004. (LI Zhipeng. Numerical Analysis of Impeller CBY in Stirred tank[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2004. (in Chinese))
- [9] 郑建坤, 赵恒文. 曲面型叶片轴流式搅拌器数值模拟研究[J]. 机械制造与自动化, 2013, 26(5): 166-168. (ZHENG Jiankun, ZHAO Hengwen. Numerical Simulation of Curved Blade Axialflow Stirrer[J]. Mechanical Manufacturing and Automation, 2013, 26(5): 166-168. (in Chinese))
- [10] 陈志平, 章序文. 搅拌与混合设备设计选用手册[K]. 北京: 化学工业出版社, 2004. (CHEN Zhiping, ZHANG Xuwen. Design manual of Mixing Equipment[K]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. (in Chinese))
- [11] C. A. J. Fletcher. Computerial Techniques for Fluid Dynamics, Vol. 1 and 2[M]. Berlin: Springer Verlag, 1990.
- [12] B. E. Launder, D. B. Spalding. Lectures in Mathematical Models of Turbulence[M]. London: Academic Press, 1972.
- [13] 彭珍珍, 赵恒文. 双曲面搅拌机流场的数值模拟研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(19): 91-94. (PENG Zhenzhen, ZHAO Hengwen. Numerical Simulation of Flow Field in Hyperboloid Stirrer[J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 25(19): 91-94. (in Chinese))
- [14] 郭聪聪, 赵恒文. 搅拌槽内挡板对搅拌效果的数值模拟[J]. 中国给水排水, 2011, 01(1). (GUO Congcong, ZHAO Hengwen. Numerical Simulation of Baffle Mixing Effects in Stirred Tank[J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 01(1). (in Chinese))
- [15] 王凯, 虞军. 搅拌设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. (WANG Kai, YU Jun. Mixing Equipment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003. (in Chinese))