

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

蒋卫国^{1,2}, 盛绍学³, 朱晓华⁴, 左 伟⁵

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

2. 民政部/教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 3. 安徽省气象局, 合肥 230061;

4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 5. 中国地图出版社 教材研究所, 北京 100054)

摘要: 准确了解区域洪水灾害风险演变状况及规律, 对于洪水灾害预警与管理具有重要意义。本文利用 1990 年和 2000 年洪水灾害风险等级数据和风险指数数据, 分析了 10 年来区域洪水灾害风险演变规律。研究表明: (1) 1990~2000 年 10 年之间, 研究区的洪水灾害风险在空间分布格局及时间演变过程上都发生了显著变化。(2) 高风险区与较高风险区的面积在增加, 较低风险区、中等风险区的面积在逐渐减少, 这是区域洪水灾害风险等级结构变化最突出的特征。(3) 区域洪水灾害风险等级之间的不对等转化是各种风险等级结构特征发生实质性变化的主要原因。(4) 2000 年区域洪水灾害风险较 1990 年高, 整个区域洪水灾害风险在增加, 但局部地区洪水灾害风险变化不一。(5) 区域洪水灾害风险演变的本质就是风险等级类型结构和功能的自组织, 对于揭示洪水灾害演变的普遍现象和机制具有重要意义。

关键词: 洪水灾害; 风险演变; 空间格局

文章编号: 1000-0585(2008)03-0502-08

1 前言

洪水灾害风险演变是一个相当复杂的系统过程, 影响因素多种多样, 涉及到自然、社会、经济等众多领域, 不同类型的因素对风险演变的作用方式、范围和程度也不同, 它们在时空尺度上交叉叠合, 从而导致风险演变的复杂性和不可预测性^[1]。洪水灾害风险不断受到各种自然和人为因素的影响而处于变化之中, 这就意味着洪水灾害风险图制作需要随着环境和条件的变化而不断完善。比如, 全球气候变化和下垫面的改变, 经济实力的变化对洪水灾害风险图精度要求的提高等, 都需要洪水灾害风险图根据变化了的条件进行更新。更新周期过长, 不能保证洪水灾害风险图的准确性; 过短, 又需要太多的工作量和经费。洪水灾害风险评估是一个不断更新、不断变化的动态过程, 当现实的风险因子、风险环境发生重大变化或者地区承受风险的能力有了明显提高时, 就需要重新进行风险评估。

区域洪水灾害风险演变分析就是从不同时期的洪水灾害风险数据中, 定量地分析和确定风险变化的特征及过程。它涉及到变化的类型、分布状况与变化量, 即需要确定变化前

收稿日期: 2007-11-12; 修订日期: 2008-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(40701172)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20070027018)、淮河流域气象开放研究基金联合资助。

作者简介: 蒋卫国(1976-), 湖南衡阳, 博士, 讲师。主要从事遥感与 GIS 在流域洪水灾害与生态环境的应用研究。

后不同时期的风险类型、界线及变化趋势。近年来，变化识别与变化检测已成为遥感研究的热点之一^[2~4]。利用遥感多光谱影像数据进行地面类型变化检测有 3 种方法：光谱类型特征分析方法、光谱变化向量分析方法和时间序列分析方法^[5]。其中时间序列分析方法在植被变化、土地资源变化、生态环境变化等领域得到广泛应用^[6~8]。

目前国内外对洪水灾害风险开展了深入研究，Anselmo 等利用水文水动力学综合模型对洪水灾害风险进行评价^[9]，新西兰国防应急管理署对 Waiho 河的洪水灾害对人口及财产产生的风险进行评价^[10]，Tawatchai 等利用 MIKE-11 水文模型模拟洪水的水位及持续时间，对孟加拉国西南部的洪水灾害进行分析与评估^[11]，赵士鹏对闽江上游地区山洪灾害风险进行了评估^[12]，黄诗峰等对洪水灾害风险评价的理论及方法进行探讨^[13]，周成虎等利用 GIS 技术将洪水灾害危险性图与易损性图进行叠加得到洪水灾害风险图^[14]，唐川等对山洪灾害风险进行评价与分区^[15]。但是对洪水灾害风险演变规律及演变空间格局的研究很少。本文以 1990 年、2000 年两个时期的洪水灾害风险等级及风险指数数据为基础，采用基于风险等级比较法和基于风险指数比较法的洪水灾害风险时间序列动态演变分析方法，分析研究区的洪水灾害风险演变的状况及规律。

2 研究区域及数据

2.1 研究区域

本文选择马来西亚吉兰丹州的哥打峇鲁县、道北县、峇卓县、巴西马县、巴西富地县、丹那美拉县、马樟县 7 个县作为研究区域。该研究区域位于吉兰丹州的东北部，它西北与泰国相邻，东北为中国南海，是洪水灾害泛滥的主要地区（图 1）。由于东北季风的影响，在每年 10 月到次年 1 月之间，洪水灾害经常发生，受洪水威胁的区域占研究区的 50% 左右，受洪水威胁的人口占研究区总人口的 60% 左右，每年洪水灾害给这个地区造成大量的经济损失^[16]。2000 年，研究区土地面积为 3240km²，人口 108 万，GDP 产值合 8000 万人民币，地形南高北低，主要种植可可、油棕、橡胶、水稻。

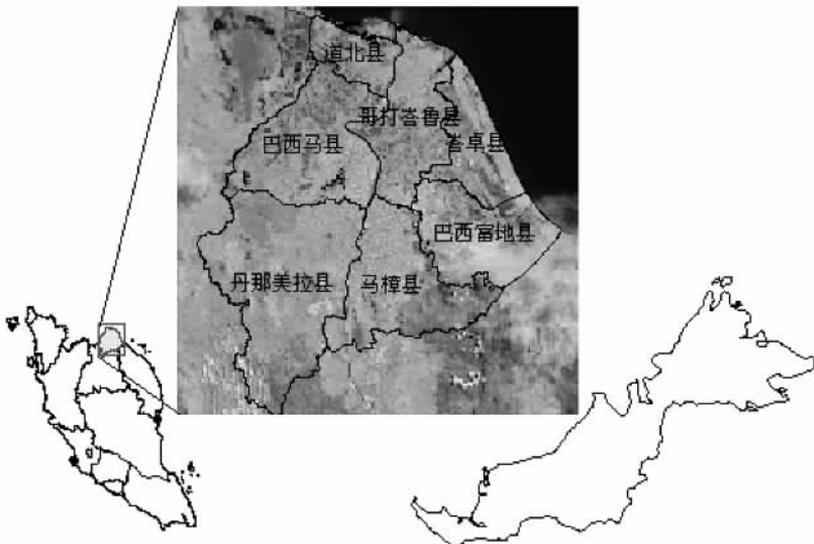


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location of the study area

2.2 研究数据

本文选取了最大 3 日降雨量及暴雨次数作为致灾因子评价指标, 高程标准差、河网密度、植被覆盖作为孕灾因子评价指标, 单位面积总人口数、单位面积老少人口数、单位面积 GDP 产值、家庭平均拥有摩托车数、家庭平均拥有电视机数、农田面积百分比作为易损性评价指标^[14,15,17], 通过空间插值、信息提取、模型计算、标准化处理等过程得到评价指标数据^[1]。利用模糊综合评估法 (FCA), 对研究区 2000 年及 1990 年的洪水灾害风险进行评估^[1], 得到 2000 年和 1990 年洪水灾害风险等级数据和风险指数数据 (图版 3, 图 2~图 5), 以此为数据基础, 开展洪水灾害风险演变研究与分析。洪水灾害风险等级数据和风险指数数据都是 GIS 栅格数据层, 栅格大小为 100m×100m。洪水灾害风险划分为低风险区、较低风险区、中等风险区、较高风险区和高风险区 5 个等级。最高风险指数为 5, 最低为 1。从 2000 年洪水灾害风险等级图上可以看出: 哥打峇鲁县的中部及北部、道北县的大部分、峇卓县的东部及北部、巴西马县的北部、巴西富地县的中部及东南部等地区的风险等级比较高, 属于较高风险区和高风险区。从 1990 年洪水灾害风险等级图上可以看出: 研究区无高风险等级; 较高风险区主要分布在哥打峇鲁县、峇卓县、巴西马县、巴西富地县等; 丹那美拉县大部分为较低风险区和低风险区。

3 研究方法

洪水灾害风险时间序列动态演变的分析方法通常可以概括为两大类: 基于风险等级比较法和基于风险指数比较法。前一类方法能区分不同风险等级间的质变, 即从一种风险等级转变为另一种风险等级, 后一类方法则可探测出每个像元风险指数的细微变化。

3.1 基于风险等级比较法

基于风险等级比较有两个方面: 一是风险等级变化速率的度量, 二是风险等级转化的计算。风险等级变化速率的度量可用动态度来衡量, 风险等级动态度反映研究区一定时间内风险等级的数量变化情况, 可以分为单一风险等级动态度 L 和风险动态度 CL ^[8]。

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

式中: L 是研究时段内的某一风险等级动态度, U_a 、 U_b 分别是初期 (1990 年) 和末期 (2000 年) 时某一风险等级的面积, CL 是研究时段内的风险动态度, U_i 为初期 (1990 年) 第 i 风险等级的面积, ΔU_{i-j} 是研究时段内第 i 风险等级转为第 j 风险等级面积的值, T 为监测时段长度。

一定区域内的不同风险等级之间具有相互转化的趋势和性质, 而且这种转化过程符合马尔柯夫随机过程的“无后效性”特征, 因此可以采用马尔柯夫转移矩阵模型来描述不同风险等级之间在时间维上的发展演变过程。马尔柯夫模型是一种特殊的随机运动过程, 它表明在一系列特定的时间间隔下, 一个亚稳定系统由 t 时刻状态向 $(t+1)$ 时刻状态转化的一系列过程, 这种转化要求 $(t+1)$ 时刻状态只与 t 时刻状态有关。马尔柯夫模型在洪水灾害风险等级转化的应用, 关键在于转移概率的确定。1990 年的低风险区转化为 2000 年其他风险区的转移概率作为第 1 行, 1990 年较低风险区转化为 2000 年其他风险区的转移概率作为第 2 行, 依次类推, 即构成一个转移概率矩阵 P ^[18]:

$$P = P_{ij} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nm} \end{bmatrix} \quad (3) \quad P_{ij} = \frac{C_{i-j}}{U_i} \quad (4)$$

式中： n 为风险等级数目， P_{ij} 为初期（1990 年）至末期（2000 年）风险等级 i 转化为 j 的概率， C_{i-j} 表示初期（1990 年）至末期（2000 年）风险等级 i 转化为 j 的面积， U_i 为初期（1990 年）第 i 风险等级的面积。

3.2 基于风险指数比较法

基于风险指数比较法主要是差值法，即将一个时间（2000 年）风险图的栅格值与另一个时间（1990 年）风险图的栅格值相减，在新生成的风险变化图中，正值表示洪水灾害风险增高，负值表示洪水灾害风险降低，而没有变化的区域为 0。这既反映了每个栅格一定时间内洪水灾害风险指数的数量变化，又反映了方向变化。还可以计算每个行政区的洪水灾害风险变化平均值 ΔR_j [7]。

$$\Delta R = R_b - R_a \quad (5) \quad \Delta R_j = \frac{\sum_{i=1}^n R_b - R_a}{n} \quad (6)$$

式中： ΔR 是研究时段内的洪水灾害风险变化值， R_a 、 R_b 分别是初期（1990 年）和末期（2000 年）时洪水灾害风险指数， ΔR_j 为第 j 个行政区洪水灾害风险变化平均值， n 为第 j 个行政区内的栅格数目。

4 结果与分析

4.1 风险等级演变分析

通过地图代数运算和图斑面积汇总，得到洪水灾害风险等级面积转换数据（表 1），由此计算出洪水灾害风险等级动态度（表 2）和洪水灾害风险等级变化转移概率矩阵。

表 1 1990~2000 年风险转移面积（单位： km^2 ）

Tab. 1 Transitions of risk zone, 1990-2000

	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	0.00	42.64	186.98	3.54	0.00
较低风险区	175.59	390.44	468.71	120.59	0.38
中等风险区	24.50	391.83	383.21	591.57	101.94
较高风险区	0.04	16.35	50.79	140.75	119.31
高风险区	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

$$P_{\text{综合}} = \begin{bmatrix} 0.00 & 18.29 & 80.19 & 1.52 & 0.00 \\ 15.19 & 33.78 & 40.56 & 10.43 & 0.03 \\ 1.64 & 26.24 & 25.67 & 39.62 & 6.83 \\ 0.01 & 5.00 & 15.52 & 43.01 & 36.46 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

1990~2000 年间，洪水灾害风险等级结构变化最突出的特征是：高风险区与较高风险区的面积大幅增加，而其他各等级则有所减少；1990 年没有高风险区，而到 2000 年则增加了 221.63km^2 ，较高风险区增加了 1.6 倍左右，这有力地证明了吉兰丹州近 10 年来洪

表 2 1990~2000 年风险动态度

Tab. 2 Dynamic degree of risk change, 1990-2000

	1990 年面积 (km ²)	2000 年面积 (km ²)	面积变化 (km ²)	动态度 (%)
低风险区	233.16	200.13	-33.03	-5.00
较低风险区	1155.71	841.26	-314.45	-3.31
中等风险区	1493.05	1089.69	-403.36	-3.72
较高风险区	327.24	856.45	529.21	2.85
高风险区	0.00	221.63	221.63	∞

水灾害风险在大幅上升。在面积减少的等级中,中等风险区减少最多,其次是较低风险区,低风险区减少最少。从动态度来看各等级的变化速率:高风险区增加最为迅速,是无穷大;中等风险区、较低风险区具有比较相近的减少速率。洪水灾害风险综合动态度是-2.99%,减少速率与较高风险区增加速率数值比较接近。这些都表明研究区各风险等级之间的系统耦合关系是极为强烈的,其演变过程错综复杂。

从灾害系统论的观点出发,可以将洪水看作一个开放的系统,风险等级之间的相互转换关系则构成了系统最基本的行为特征和功能表现。在数量上,2000年高风险区的总输入中53.83%来自于较高风险区,46.00%来自中等风险区,总输出为0;2000年较高风险区的总输入中82.66%来自中等风险区,而其总输出中又有63.98%变为高风险区;1990年低风险区转化为较低风险区、中等风险区、较高风险区的比例为18.29%:80.19%:1.52%;1990年较低风险区转化为低风险区、中等风险区、较高风险区、高风险区的比例为15.19%:40.56%:10.43%:0.03%;这些都表明风险等级之间的不对等转化是洪水灾害风险等级结构特征发生实质性变化的主要原因。

4.2 风险指数演变分析

通过两个时期的洪水灾害风险数据相减计算,得到每个栅格洪水灾害风险指数变化值和变化方向(图版3,图6、图7)。研究区洪水灾害风险指数变化值在-1.780~2.087之间,负值表示洪水灾害风险逐渐减少,正值表示洪水灾害风险逐渐增加。规定变化值小于-1.0为洪水灾害风险减少区、-1.0~-0.5为洪水灾害风险较减少区、-0.5~0.5之间为洪水灾害风险变化微弱区、0.5~1.0之间为洪水灾害风险较增加区、大于1.0为洪水灾害风险增加区,并制成洪水灾害风险变化等级专题图(图6)。近10年来,马樟县及道北县绝大部分的洪水灾害风险在逐渐增加,属于风险较增加区及风险增加区;哥打峇鲁县及峇卓县北部的洪水灾害风险也在逐渐增加,属于风险较增加区及风险增加区;巴西富地县的中部及西南部的洪水灾害风险也在逐渐增加,属于风险较增加区及风险增加区;哥打峇鲁县、峇卓县与巴西富地县的交界处,丹那美拉县与巴西马县的交界处,洪水灾害风险在逐渐减少,属于风险较减少区及风险减少区。风险增加区的面积占整个区域的22.11%,风险较增加区为27.11%,风险变化微弱区为37.15%,风险较减少区为11.20%,风险减少区只有2.44%,整个区域有49.22%的区域风险在增加。对于风险增加重点地区,要做好预防灾害的各种措施,增加各种承灾体的抗风险能力,将风险降低到最低水平。

同时叠加县级行政区、乡镇行政区、街区等边界数据,统计每个县、乡镇、街区的洪水灾害风险变化平均值,洪水灾害风险变化面积,并对结果排序得到每个县、乡镇、街区的洪水灾害风险变化情况。近10年来7个县的洪水灾害风险变化平均值大小排序是:马

樟县(1.00) > 道北县(0.94) > 巴西富地县(0.67) > 哥打峇鲁县(0.41) > 峇卓县(0.28) > 丹那美拉县(-0.01) > 巴西马县(-0.05), 前 5 个县的风险变化均值为正值, 表示洪水灾害风险在增加, 丹那美拉县及巴西马县面临的洪水灾害风险在逐渐减少。近 10 年来, 研究区的洪水灾害风险变化均值为 0.36, 表示整个区域的洪水灾害风险在增加, 但从局部地区(县、乡镇、像元)来看。要根据洪水灾害风险变化值大小, 制定不同的符合当地情况的洪水灾害风险预防措施, 以减少洪水灾害影响和损失。

5 结论

本研究表明, 洪水灾害风险是一个不断更新、不断变化的动态过程, 当现实的风险因子、风险环境发生重大变化或者地区承受风险的能力有了明显提高时, 就需要重新进行风险评估。通过区域洪水灾害风险演变格局研究得出以下结论: (1) 1990~2000 年 10 年之间, 研究区的洪水灾害风险在空间分布格局及时间演变过程上都发生了显著变化。(2) 从风险等级演变来分析, 风险等级空间分布、风险等级结构组成、风险等级转化、风险等级动态等方面都不一样。1990~2000 年间, 各种风险等级结构变化最突出的特征是: 高风险区与较高风险区的面积在增加, 较低风险区、中等风险区的面积在逐渐减少。各种风险等级之间的不对等转化是各种风险等级结构特征发生实质性变化的主要原因。从风险指数变化来看, 整个区域风险整体在增加, 但局部地区风险变化不一, 有的地区风险在增加, 有的地区风险在减少。(3) 从系统论的观点看, 区域洪水灾害风险演变的本质就是风险等级类型结构和功能的自组织, 风险等级、风险指数之间的系统耦合关系是极为强烈的。这种自组织过程是自然因素和人为因素综合作用的结果, 当作用强度达到一定程度就会引起风险等级结构及风险指数的演变, 它是一个错综复杂的演变过程, 其具体的因果关系和作用机制还有待进一步的深入研究。

致谢: 本文得到马来西亚国家遥感中心机载航空遥感项目支持, MACRES 的 Dato' Nik Nasruddin Mahmood, Jimat Bolhassan, Mardiana Shafiee, Azman Ahmad, Faizu Hassan 及 TPM 公司的 Lim Boon Sheng, Tay Lip Hong, Lim Boon Leong, Seng Chung Yue, Low Tsuey Min 为本文提供相关资料及指导, 并处理相关数据, 特此表示感谢。

参考文献:

- [1] 蒋卫国. 基于遥感与 GIS 的洪水灾害风险模糊评估及其演变驱动机制研究. 北京师范大学博士论文, 2006. 16~99.
- [2] Ross S Lunetta, Christopher D Elvidge. Remote Sensing Change Detection. Princeton, USA: Taylor and Frances Press. 1999. 5~20.
- [3] 李德仁. 利用遥感影像进行变化检测. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28: 7~12.
- [4] 马建文, 田国良, 王长耀. 遥感变化检测技术发展综述. 地球科学进展, 2004, 19(2): 192~196.
- [5] 赵英时, 等. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2003. 241~250.
- [6] 陈云浩, 李小兵, 陈晋, 史培军. 1983—1992 年中国陆地植被 NDVI 演变特征的变化矢量分析. 遥感学报, 2002, 6(1): 12~18.
- [7] 蒋卫国, 陈云浩, 李京. 中国北方农牧交错带生态环境的空间格局演变. 自然资源学报, 2005, 20(6): 871~878.
- [8] 侯西勇, 庄大方, 于信芳. 20 世纪 90 年代新疆草地资源的空间格局演变. 地理学报, 2004, 59(3): 409~417.
- [9] Anselmo V, Galeati G, Palmieri S, *et al.* Flood risk assessment using an integrated hydrological and hydraulic modelling approach: A case study. Journal of Hydrology, 1996, 175: 533~554.
- [10] Ministry of Civil Defence & Emergency Management. Waiho River Flooding Risk Assessment Report. 2002. 1~

51. <http://www.civildefence.govt.nz/memwebsite.nsf/Files/MCDEMWaihoRiverRiskAssessment>.
- [11] Tawatchai Tingsanchali, Mohammed Fazlul Karim. Flood hazard and risk analysis in the southwest region of Bangladesh. *Hydrological Process*, 2005, 19: 2055~2069.
- [12] 赵士鹏. 闽江上游地区山洪灾害风险评估. *地理研究*, 1997, 16(1): 98~103.
- [13] 黄诗峰, 周成虎, 万庆, 等. 洪水灾害风险评价初析. *地理研究*, 1998, 17(增刊): 71~77.
- [14] 周成虎, 万庆, 黄诗峰. 基于 GIS 的洪水灾害风险区划研究. *地理学报*, 2000, 55(1): 15~24.
- [15] 唐川, 朱静. 基于 GIS 的山洪灾害风险区划. *地理学报*, 2005, 60(1): 87~94.
- [16] Department Irrigation and Drainage (DID). National Register of River Basins. Final Report, Volume 2. 8, Updating of Condition of Flooding in Malaysia, State Report for Kelantan. 2003. 10~35.
- [17] 高吉喜, 中村武洋, 潘英姿. 洪水易损性评价——洞庭湖地区案例研究. 北京: 中国环境科学出版社, 2004. 30~60.
- [18] 蒋卫国, 王文杰, 谢志仁. 基于 RS 和 GIS 的三江平原湿地景观变化研究. *地理与地理信息科学*, 2003, 19(2): 28~31.

Change and spatial pattern of flood disaster risk

JIANG Wei-guo^{1,2}, SHENG Shao-xue³, ZHU Xiao-hua⁴, ZUO Wei⁵

- (1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Academy of Disaster Reduction and Emergence Management, Ministry of Civil Affairs and Ministry of Education, Beijing 100875, China; 3. Anhui Meteorological Bureau, Hefei 230061, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 5. SinoMaps Press, Beijing 100054, China)

Abstract: Flood disasters are among the world's most frequent and damaging types of disaster. Flood hazard, flood risk and disasters are the products of an interaction between environmental and social processes. Accurate comprehension of the condition and rule of flood disaster risk change is of critical importance for early warning and flood disaster administering. The study area, situated in the northeast of Kelantan Delta in Malaysia, is the main flood disaster area. In the other papers, the maps and data of flood disaster risk zones and flood risk index have been calculated using the Fuzzy Comprehensive Assessment (FCA) method. In this paper, the condition and rule of risk change in the past decade are analyzed based on risk zone data and risk index data of flood disasters in 1990 and 2000. The risk data of the two phases are overlaid and areas of risk zone changes are summarized. Risk dynamic degree, transition matrix of risk zone change, risk index change, and the mean of change are calculated. Some conclusions are drawn as follows: (1) The variation of risk zones is significant in the spatial pattern and time change from 1990 to 2000. (2) Highest risk zone and higher risk zone are increasing. Moderate risk zone and lower risk zone are decreasing. (3) Conversion among risk zones is lopsided. It is the main reason for the variation taking place in the spatial pattern of risk zones. (4) Mean risk index of 2000 is higher than that of 1990 in the whole area. Risk change is different in the local zones. (5) The change process of flood disaster risk is self-organized and complex. The self-organized character of flood disaster system is significant to reveal the internal universal phenomenon and mechanism.

Key words: flood disaster; risk change; spatial pattern

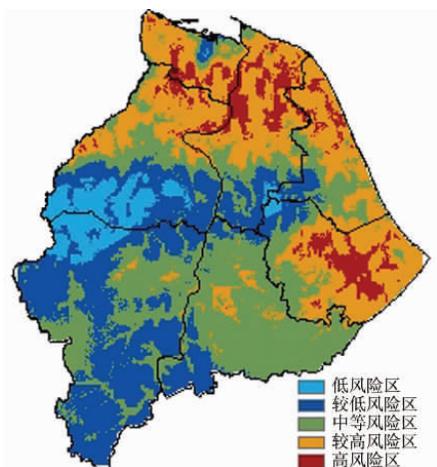


图 2 2000 年洪水灾害风险等级

Fig.2 Risk zone of flood disaster in 2000

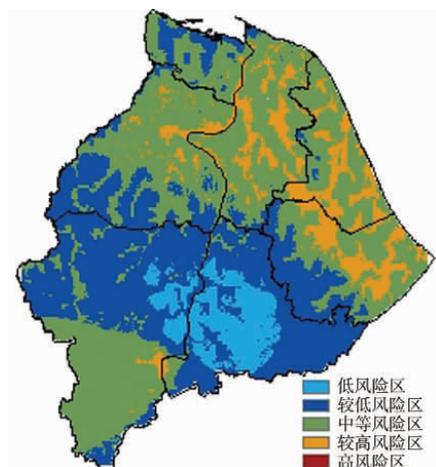


图 3 1990 年洪水灾害风险等级

Fig.3 Risk zone of flood disaster in 1990

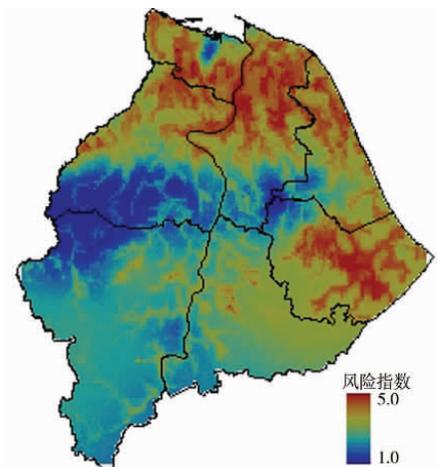


图 4 2000 年洪水灾害风险指数

Fig.4 Risk index map of flood disaster in 2000

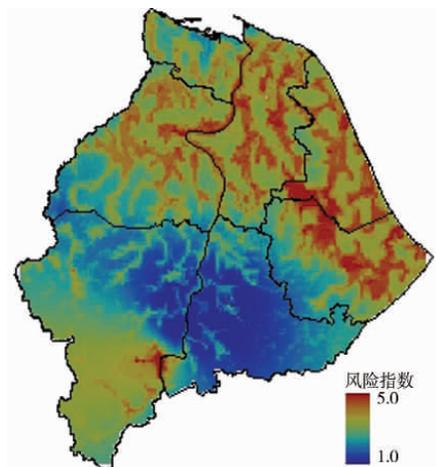


图 5 1990 年洪水灾害风险指数

Fig.5 Risk index map of flood disaster in 1990

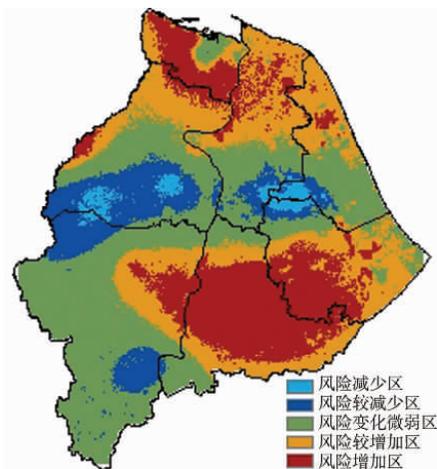


图 6 洪水灾害风险变化分区

Fig.6 Risk change zone of flood disaster

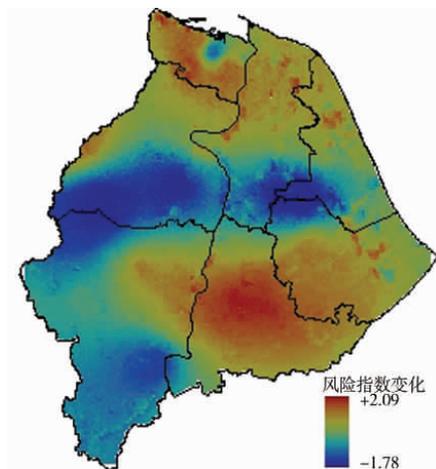


图 7 洪水灾害风险变化指数

Fig.7 Risk index change of flood disaster