

余丰华, 刘正华, 夏跃珍, 等. 基于敏感指数主成分分析法的浙江沿海突发性地质灾害易发区评价[J]. 灾害学, 2015, 30(4): 64-68. [Yu Fenghua, Liu Zhenghua, Xia Yuezhen, et al. Evaluation of the unexpected geological disasters distributions in coastal region of Zhejiang Province base on Sensitivity Coefficient and Principal Component Analysis[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(4): 64-68.]

基于敏感指数主成分分析法的浙江沿海突发性 地质灾害易发区评价*

余丰华^{1,2}, 刘正华^{1,2}, 夏跃珍², 张达政², 余恬钰²

(1. 中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 浙江省地质环境监测院, 浙江 杭州 310007)

摘要: 浙江海洋经济示范区具有非常重要的经济地位, 崩塌、滑坡、泥石流等突发性地质灾害严重威胁该区域的社会经济发展。该文通过地质灾害点对坡度、坡向、地质、岩性、降雨、植被、断层、道路、水系等因素的敏感性计算, 获得评价价格网的各指标的综合面积指数, 采用主成分分析法计算评价价格网各要素的综合分值, 表征格网地质灾害脆弱性, 对示范区地质灾害脆弱性进行分级, 结合典型区域的地质灾害易发区规划作为样本, 对脆弱性等级划分标准进行调整得到区域地质灾害易发程度分区, 为区域地质灾害防御及工程建设活动提供参考依据。

关键词: 敏感指数; 主成分分析; 地质灾害; 易发区评价; 浙江沿海地区

中图分类号: P694; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2015)04-0064-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.04.013

浙江海洋经济发展示范区是指包括浙江全部海域和杭州、宁波、温州、嘉兴、绍兴、舟山、台州等7个市及47个沿海县(市、区)的陆域(含舟山群岛、台州列岛、洞头列岛等岛群)。示范区土地面积34 671 km², 户籍人口2 767.21万人, 国内生产总值21 225.73亿元^[1], 占浙江省的比例分别为34.1%, 57.9%和66.3%, 具有非常重要的政治经济地位。

示范区地处我国东南沿海亚热带季风气候区, 汛期台风及阶段性强降雨是诱发区内多发、群发、突发性地质灾害的常见因素。根据已有调查资料, 截至2013年底, 示范区内崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害点2 054处, 类型以滑坡为主, 占57.7%, 崩塌次之, 占33.4%, 泥石流占8.9%, 详见表1。各类地质灾害规模均以小型为主, 占示范区内调查灾害点总数的98.6%, 其次为中型, 占总数的1.4%。地质灾害对示范区社会经济建设活动构成严重的威胁。

表1 示范区地质灾害类型统计表

类型	点数	比例/%	灾害点数		灾害规模	
			已发生点	隐患点	中型	小型
滑坡	1 184	57.7	670	950	13	1 171
崩塌	687	33.4	261	563	11	676
泥石流	183	8.9	126	136	4	179
总计	2 054	100	1 057	1 649	28	2 026

地质灾害易发区是指具备地质灾害发生的地质构造、地形地貌和气候条件, 容易或者可能发生地质灾害的区域。易发区对于区域地质灾害灾情及险情在历史认知、现状把握以及未来趋势预测都具有非常重要的意义, 是地质灾害隐患点的工程治理、搬迁避让或监测预警等防治工作内容一个重要参考依据。美国、日本及欧洲等经济较为发达的国家或地区对区域地质灾害易发性评价工作开展较早, 评价方法成熟且多样, 相关法律法规的制订及执行也较为严格。我国对突发性地质灾害先后发布了地质灾害防治条例(2003年)、国务院关于加强地质灾害防治工作的决定(2011年)等加以规范, 从1999年开始逐步在地质灾害多发的山地丘陵区以县为单位开展了县(市)地质灾害的调查与区划工作, 根据国土资源部公报数据, 截止到2009年, 已经全面完成了1 640个县(市、区)的灾害调查与易发区评价。

地质灾害易发区主要依据地质环境条件, 充分考虑现状地质灾害的发生频次, 参考地质灾害现状和人类工程活动划定, 通常分为高易发区、中易发区、低易发区和不易发区4个等级。在进行地质灾害易发性分区评价工作中, 通常采用的评价方法有层次分析法(AHP)、模糊评价法、权重指数法等, 这些均可视为综合指数法, 是一种半

* 收稿日期: 2015-03-19

修回日期: 2015-05-08

基金项目: 中国地调局南京地调中心项目浙江海洋经济发展示范区地质环境调查评价(1212011220007)

作者简介: 余丰华(1976-), 男, 河南信阳人, 高级工程师, 主要从事突发性地质灾害气象风险预警工作。

E-mail: yu_fenghua@163.com

定量化的评价方法,评价过程中,需要通过专家对评价指标分级,建立评分准则及权重分配标准,最后采用加权系数,通过计算综合分值表示地质灾害的易发程度,再结合地质灾害防治实际需求,划分地质灾害易发区。综合指数法具有直观性强、方法简洁和计算功能简单的优点,但在面向具体应用时存在如下问题。首先对于现状地质灾害采用点、面和体积模数比的方法,对于崩塌、滑坡、泥石流等不同类型的地质灾害在规模、灾情、险情等级,致灾因子的描述及评价指标等均存在差异,其次由于评价指标分值和指标等级通过专家打分法确定^[2-4],受主观干扰大,最后由于计算过程中对影响因子的逐级分级概化,计算结果变成了对有限因子评分数据的组合,在对区域地质环境脆弱性进行动态连续描述方面存在欠缺。

采用信息量模型、证据权法等定量化的地质灾害易发性分区方法是突发性地质灾害区划的一个重要研究内容^[5]。本次评价工作采用的主成分分析法也是量化的一种,该方法在综合性评价工作中采用广泛^[6-7],通过对各影响因子的单项分值计算得到综合分值表示孕灾体地质灾害脆弱性指数,各影响因子单项分值的计算通过综合面积指数实现,综合面积指数则由敏感指数通过量化方法计算。地质灾害易发程度划分标准以脆弱性指数为基础,选择示范区内部分区域的地质灾害防治规划、县市地质灾害调查与区划作为样本来划分等级,为示范区内产业带规划、建筑区规划,山地丘陵区工程建设活动中地质灾害防御提供参考依据。

1 基础数据

评价从地形地貌、地质构造、地层分布及岩土体结构特征、气象水文条件、人类活动等5个方面选择^[8],包括6个面状要素(坡度、坡向、地质、岩性、降雨、植被)和3个线状要素(断层、道路、水系)。道路、水系数据由1:25万数字线划图(DLG)提取;地质、岩性、断层数据来自于浙江省地质图(1:50万);植被类型来自于浙江省森林分布图(1:50万);坡度、坡向数据由数字高程模型(STRM DEM)计算得到,基础数据精度约75 m。基于现有数据精度和空间地形地貌等区域差异,评价单元采用边长为1 km规则方格网。

2 评价步骤

(1) 单元格划分

对评价区划分评价单元,在ArcGIS平台上生成39 954个方格网,对每个网格编号,将其作为识别评价单元的标识,用来实现ArcGIS平台上空

间数据和SPSS属性数据对应连接。

(2) 敏感指数的计算

对计算过程中各级元素(集),采用图素、要素及专题来表示,专题表示不同要素的集合,可以理解为矢量化了的点、线、区文件;要素表示具备相同属性的图素的集合,如地质图中的玄武岩;图素代表数字化介质中实体的基本单位,如编号为7的玄武岩记录。

针对特定的专题,地质灾害在各要素类型中发生的频次是不同的,为了表示各要素内地质灾害的易发性,采用敏感指数(SensitivityCoefficient)进行表示,敏感指数与特定要素对应,计算公式如下:

$$i = \frac{pp_a}{pp_s} = \frac{m/M}{a/A} \quad (1)$$

式中: SC_i 为专题中特定要素的敏感指数; pp_a 为灾害点在第 i 类要素中的条件概率,为第 i 类要素中灾害点个数与第 i 类要素面积的比值; pp_s 为灾害点在专题中的先验概率,可以表示为专题内的灾害点个数与专题面积的比值; M 为研究区灾害总点数; A 为研究区总面积; m 为第 i 类要素内灾害数量; a 为第 i 类要素面积。

通过式(1)计算逐要素的敏感指数。要素的敏感指数表示要素与地质灾害关系密切程度,数值越大,表示该要素与地质灾害潜在关系越密切,越容易发生地质灾害。

(3) 综合面积的计算

针对特定专题,计算规则格网的综合面积。首先用方格网将专题切割(图1),对于每个切分单元,可能存在多个不同的图素,分别计算各图素面积,用 S_{z11} 、 S_{z12} ……等表示,每个图素类型均对应一个要素的敏感指数。

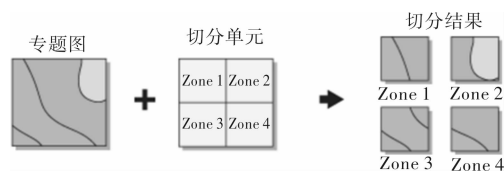


图1 采用规则格网切分专题示意图

逐个计算格网内的图素的面积与该图素对应的权重系数求积,权重系数为对应要素敏感指数 SC_i 。格网的综合面积为上述各图素计算结果的累计,计算公式如式(2)所示。

$$S_{zone1} = S_{z11} SC_1 + S_{z12} SC_2 + \dots + S_{z1n} SC_n \quad (2)$$

式中: S_{zone1} 为 zone1 格的综合面积; S_{z11} 为 zone1 格内第 1 个图素面积; SC_1 为 zone1 格内第 1 个图素对应要素的敏感指数; n 表示 zone1 格内包含的图素数量。

通过这种方式,计算每个格网的综合面积。

(4) 综合面积指数的计算

综合面积指数的计算方式如式(3)所示。

$$A_{\text{zone1}} = S_{\text{zone1}} / S_0 \quad (3)$$

式中： A_{zone1} 为 zone1 综合面积指数； S_0 为 zone1 格网的实际面积，若非边界格网，一般为 1 km^2 。

由式(3)计算每个格网的综合面积指数，综合面积指数是对面积进行的无量纲化处理，综合面积指数的大小表示在特定专题的影响下(其余专题相同)，每个格网地质灾害易发性大小。

通过上面的计算过程，可以得到每个格网单专题的综合面积指数，作为格网的属性，以此计算步骤，可以获得其余专题的综合面积指数，分别作为格网的属性。对于线状要素，选择缓冲区的方式进行，通过计算分析，道路、水系、断层缓冲距离分别为 300 m、300 m 和 2.5 km。

3 主成分分析计算综合评价指标

上述计算过程主要通过 ArcGIS 软件平台上实现，通过计算可以得到的数据样式为每个具有空间展布的规则格网，每格网具备 9 个属性，属性值为各要素的综合面积指数。

采用主成分分析法进行综合指标(地质灾害脆弱性)的计算。主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)是将众多具有一定相关性的专题通过降维的方式，重新组合成一组新的互相无关的综合指标来代替原来的指标来描述、理解和分析实体的一种多元统计方法。其原理这里不进行过多叙述，可以理解为通过坐标轴旋转，长轴的变量就描述了数据的主要变化，而代表短轴的变量就描述了数据的次要变化，长轴变量代表了数据包含的大部分信息，就用该变量代替原先的两个变量。数据计算分析在 SPSS 软件平台上实现。

首先对各评价单元网格的地质、岩性等综合面积指数采用正规化方法进行数据标准化处理，将属性转换为各自的 Z 分值(Zero-mean Normalization)，使数据符合标准正态分布。标准化的地质环境属性数据为 $Z_1 \sim Z_9$ 。对数据进行主成分运算，

为保证累积贡献率达到 85% 以上，这里提取了 6 个主成分(累计贡献率达到 86.997%)。运算数据如表 2、表 3、表 4。

从成分矩阵表中可以看出，综合得分和岩性、坡度、坡向、地质、植被及降雨相关性较好，说明它们存在信息上的重叠，但对于线性水系、断层及道路则相关性相对较弱，可能原因是但从这个因素考虑，平缓地区的路网水网密度普遍高于山地丘陵区。

为了计算每个评价单元的综合分值，来量化地表示各单元地质灾害相对易发性，用成分矩阵中各要素对应的 6 项成分，除以解释总方差表中合计项对应值的算术平方根，得到 6 个主成分($F_1 \sim F_6$)的系数如表 5 所示。

生成各成分公式是如下：

$$F_1 = 0.415Z_1 + 0.463Z_2 + 0.415Z_3 + 0.419Z_4 + 0.418Z_5 + 0.290Z_6 + 0.008Z_7 + 0.074Z_8 + 0.025Z_9, \quad (4)$$

$$F_2 = 0.191Z_1 - 0.019Z_2 - 0.049Z_3 - 0.209Z_4 + 0.006Z_5 - 0.014Z_6 + 0.643Z_7 + 0.233Z_8 + 0.670Z_9, \quad (5)$$

$$F_3 = 0.148Z_1 + 0.034Z_2 - 0.024Z_3 + 0.035Z_4 - 0.034Z_5 - 0.435Z_6 - 0.245Z_7 + 0.845Z_8 - 0.100Z_9, \quad (6)$$

$$F_4 = -0.261Z_1 - 0.225Z_2 - 0.143Z_3 + 0.174Z_4 - 0.082Z_5 + 0.709Z_6 + 0.240Z_7 + 0.444Z_8 - 0.258Z_9, \quad (7)$$

$$F_5 = -0.219Z_1 - 0.049Z_2 - 0.028Z_3 + 0.130Z_4 + 0.102Z_5 + 0.331Z_6 - 0.650Z_7 + 0.105Z_8 + 0.615Z_9, \quad (8)$$

$$F_6 = -0.359Z_1 + 0.165Z_2 + 0.780Z_3 - 0.384Z_4 - 0.236Z_5 + 0.005Z_6 + 0.110Z_7 + 0.107Z_8 - 0.097Z_9. \quad (9)$$

取前 6 项主成分各项方差比例，按比例进行重新调整，得到调整比例系数，如表 6 所示。

根据调整后的比例，得到结果如式(10)所示。

$$F = 0.428F_1 + 0.182F_2 + 0.130F_3 + 0.104F_4 + 0.085F_5 + 0.070F_6. \quad (10)$$

将式(4)~式(9)($F_1 \sim F_6$)代入得到 F 与 $Z_1 \sim Z_9$ 关系如式(11)所示。

$$F = 0.1607Z_1 + 0.183345Z_2 + 0.207918Z_3 + 0.125814Z_4 + 0.159204Z_5 + 0.16763Z_6 + 0.066544Z_7 + 0.246882Z_8 + 0.138531Z_9. \quad (11)$$

表 2 相关矩阵

	植被(Z_1)	岩性(Z_2)	地质(Z_3)	坡度(Z_4)	坡向(Z_5)	降雨(Z_6)	水系(Z_7)	断层(Z_8)	道路(Z_9)
植被(Z_1)	1	0.615	0.461	0.517	0.494	0.21	0.122	0.152	0.165
岩性(Z_2)	0.615	1	0.629	0.546	0.59	0.319	-0.023	0.072	0.027
地质(Z_3)	0.461	0.629	1	0.473	0.472	0.324	-0.025	0.054	0.011
坡度(Z_4)	0.517	0.546	0.473	1	0.485	0.404	-0.109	0.079	-0.149
坡向(Z_5)	0.494	0.59	0.472	0.485	1	0.345	-0.001	0.065	0.051
降雨(Z_6)	0.21	0.319	0.324	0.404	0.345	1	0.079	-0.026	0.021
水系(Z_7)	0.122	-0.023	-0.025	-0.109	-0.001	0.079	1	0.057	0.322
断层(Z_8)	0.152	0.072	0.054	0.079	0.065	-0.026	0.057	1	0.081
道路(Z_9)	0.165	0.027	0.011	-0.149	0.051	0.021	0.322	0.081	1

表3 解释的总方差

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%
1	3.353	37.25	37.25	3.353	37.25	37.25
2	1.429	15.872	53.123	1.429	15.872	53.123
3	1.016	11.292	64.415	1.016	11.292	64.415
4	0.817	9.078	73.493	0.817	9.078	73.493
5	0.665	7.388	80.881	0.665	7.388	80.881
6	0.55	6.117	86.997	0.55	6.117	86.997
7	0.506	5.627	92.624			
8	0.364	4.048	96.673			
9	0.299	3.327	100			

表4 成分矩阵

成分	1	2	3	4	5	6
Z_1	0.76	0.228	0.15	-0.236	-0.179	-0.266
Z_2	0.849	-0.023	0.035	-0.204	-0.04	0.123
Z_3	0.76	-0.059	-0.024	-0.13	0.023	0.579
Z_4	0.767	-0.25	0.035	0.157	-0.106	-0.285
Z_5	0.766	0.007	-0.034	-0.074	0.083	-0.175
Z_6	0.531	-0.016	-0.439	0.64	0.27	0.004
Z_7	0.015	0.768	-0.247	0.217	-0.53	0.082
Z_8	0.136	0.279	0.852	0.402	0.086	0.08
Z_9	0.046	0.801	-0.101	-0.233	0.502	-0.072

表5 主成分系数计算结果

	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
Z_1	0.415	0.191	0.148	-0.261	-0.219	-0.359
Z_2	0.463	-0.019	0.034	-0.225	-0.049	0.165
Z_3	0.415	-0.049	-0.024	-0.143	0.028	0.78
Z_4	0.419	-0.209	0.035	0.174	-0.13	-0.384
Z_5	0.418	0.006	-0.034	-0.082	0.102	-0.236
Z_6	0.29	-0.014	-0.435	0.709	0.331	0.005
Z_7	0.008	0.643	-0.245	0.24	-0.65	0.11
Z_8	0.074	0.233	0.845	0.444	0.105	0.107
Z_9	0.025	0.67	-0.1	-0.258	0.615	-0.097

表6 原始方差贡献率与调整比例系数

比例	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	累积
原始	37.25	15.872	11.292	9.078	7.388	6.117	86.997
调整	42.8	18.2	13	10.4	8.5	7	100

采用式(11),可以对每个单元格9个标准化的属性值($Z_1 \sim Z_9$)计算一个综合分值。根据主成分分析的原理,综合分值的大小一定程度上反映滑坡灾害影响因子对滑坡发生的总的贡献程度,即滑坡灾害因子对灾害发生的敏感程度。综合分值越小,说明该滑坡点的灾害背景条件越好,越不利于滑坡灾害的发生。反之,如果综合分值越大,说明该滑坡点的灾害背景条件越差,越有利于滑坡灾害的发生。

为了更直观显示综合分值的分布情况,将综合分值从小到大进行排列,数据分布情况如图2所示。

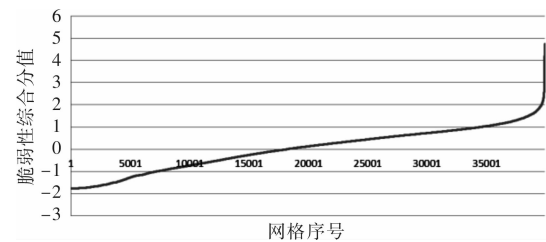


图2 综合分值的分布情况(从小到大排序)

综合分值是一系列离散数据,范围区间为 $-1.6 \sim 5.5$,定量反映了各评价单元格与地质灾害密切相关的地质环境脆弱性情况,中间没有进行易发区划分对应的明显拐点,现实中对这类数据也没有成熟的数据聚类分析方法。采用克里金(Kriging)插值办法可以得到数据的空间分布(图3),可以看出其规律性是显而易见的。选择沿海各市地质灾害防治规划及县市地质灾害调查区划

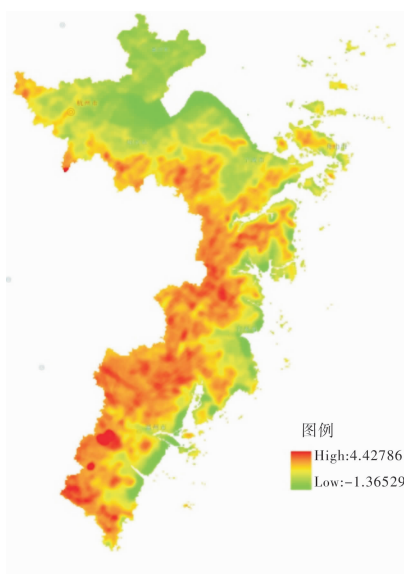


图3 示范区脆弱性插值结果

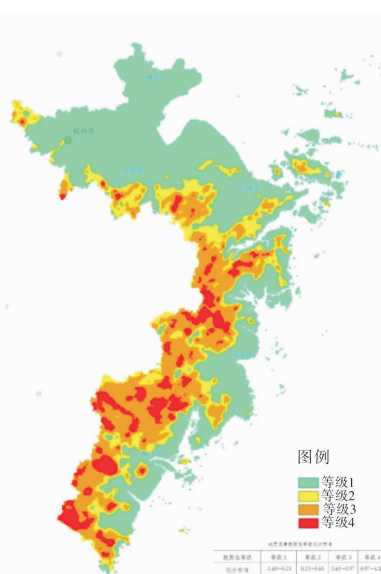


图4 示范区脆弱性分级图

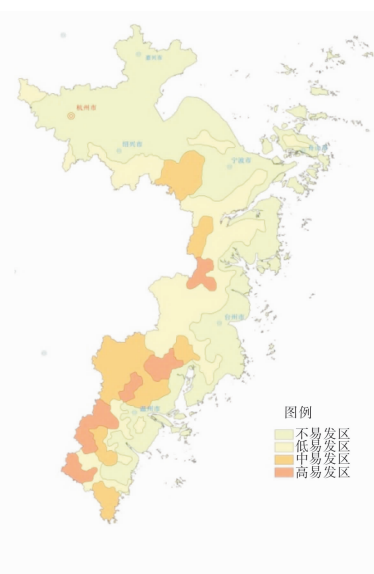


图5 示范区地质灾害易发程度分区图

部分作为样本, 确定脆弱性等级的划分标准(表 7), 将示范区脆弱性评价结果分成 4 个等级, 获得脆弱性分级图(图 4), 脆弱性分级图定量反映示范区地质灾害的脆弱性高低。

表 7 地质灾害脆弱性等级划分标准

分级	等级 1	等级 2	等级 3	等级 4
标准	-1.60 ~ 0.23	0.23 ~ 0.65	0.65 ~ 0.97	0.97 ~ 5.50

4 易发程度分区

以脆弱性分级图为基础, 综合地质灾害点分布及实际地质环境条件圈定地质灾害易发程度分区图(图 5)。共圈定 20 个易发区, 累计面积 16 132.8 km², 占示范区总面积的 44.8%。其中高易发区 5 处, 累计面积 6.5 km², 占示范区总面积的 6.5%; 中易发区 6 处, 累计面积 5 071.3 km², 占示范区面积的 14.1%; 低易发区 9 处, 累计面积 8 716.9 km², 占示范区面积的 24.2%。其余为不易发区, 占示范区总面积的 55.2%。

5 结语

(1) 综合考虑现有比例尺空间数据的区域分异性和灾害点孕灾环境及承灾体空间展布特征, 以 1 km 方格网作为评价单元, 保证区域综合评价成果的精度。

(2) 采用敏感指数表征要素与地质灾害关系的密切程度, 体现了地质环境相似类比的基本评价方法, 通过这种方法, 实现了评价指标的量化表达, 根据量化数值赋对应因子权重, 减少了主观因素的干扰, 提高了评价成果的客观性。

(3) 采用主成分分析方法对地质环境脆弱性进行了综合评价, 具有成熟的数理统计理论支撑和应用实践, 保证了评价成果的科学性。

(4) 在脆弱性评价基础上进行易发区划分时, 选择示范区内已完成的县(市)地质灾害调查与区划易发区作为样本, 同时兼顾现有地质灾害及隐患点的空间分布, 确定易发区分级标准, 保证了成果与各级地质灾害防治行政管理工作的一致性。

(5) 评价成果对于浙江海洋经济发展示范区产业带规划、建筑区规划及重大工程点地质灾害防御等工作具有重要参考意义。

参考文献:

- [1] 浙江省统计局. 2014 浙江统计年鉴[M]. 浙江: 中国统计出版社, 2014: 519-525.
- [2] 沈万里. 地质灾害易发程度区划方法探讨[J]. 浙江国土资源, 2014, 7(1): 40-43.
- [3] 吴涛, 诸先尧, 冯立新. 浙江泰顺县地质灾害易发区划方法探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(1): 116-121.
- [4] 崔爱平. 应用信息系统空间分析和干扰系数法对略阳县地质灾害易发区的划分[J]. 灾害学, 2004, 19(2): 51-55.
- [5] 高振记, 郭伦, 赵兴征. 基于 GIS 的深圳市滑坡危险性区划研究[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 67-73.
- [6] 范文, 刘雪梅, 高德彬, 等. 主成分分析法在地质灾害危险性综合评价中的应用[J]. 西安工程学院学报, 2001, 23(4): 53-57.
- [7] 张文, 陈剑平, 秦胜伍, 等. 基于主成分分析的 FCM 法在泥石流分类中的应用[J]. 吉林大学学报, 2010, 40(2): 368-372.
- [8] 唐增才, 袁强. 浙江地质灾害发育类型和分布特征[J]. 灾害学, 2007, 22(1): 94-97.

Evaluation of the Unexpected Geological Disasters Distributions in Coastal Region of Zhejiang Province Base on Sensitivity Coefficient and Principal Component Analysis

Yu Fenghua^{1,2}, Liu Zhenghua^{1,2}, Xia Yuezhen², Zhang Dazheng² and She Tianyu²

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Zhejiang Province Institute of Geo-environment Monitoring, Hangzhou 310007, China)

Abstract: The Marine Economy Demonstration Area of Zhejiang Province is very important on economic status. Geological hazards of collapse, landslide, debris flow and so on are factors which threaten the social economic development. In this paper, we calculate the sensitive coefficient based on historical hazard and slope, aspect, geological, lithology, rainfall zoning and vegetative cover etc. To obtain comprehensive area index of each evaluation grid, the principal component analysis method is used to gain the comprehensive score of grid which indicate the vulnerability of the certain grid. Finally, we use the method on the typical regional geological disaster areas as an example and divide four grades according to the score results. The results are benefit to the regional geological disaster prevention and engineering activities.

Key words: sensitivity coefficient; principal component analysis; geological hazard; prone area evaluation; coastal region of Zhejiang province