文章编号:1003-9414(2000)02-0118-10

城市岩溶塌陷灾害风险评估方法
—以贵州六盘水市为例①

雷明堂,蒋小珍,李瑜,周立新
(中国地质科学院岩溶地质研究所,广西桂林 541004)
高金川
(中国地质大学,湖北武汉 430074)

摘　要:岩溶塌陷是我国岩溶区主要地质灾害,它和崩塌、滑坡、泥石流以及地面沉降、地裂缝等构成我国六大地质灾害类型。随着我国"地质灾害防治管理办法"颁布和实施,不同灾种的风险评估已成为地质灾害防治管理的重要内容。针对城市岩溶塌陷风险评估问题,中国地质科学院岩溶地质研究所塌陷项目组结合多年岩溶塌陷研究的经验,研制开发了基于GIS技术的岩溶塌陷灾害管理与风险评估系统(GMRS)。本文以水城盆地为例,全面介绍运用GMRS进行岩溶塌陷风险评估的内容、方法和步骤,最后,对风险评估的结果作了详细讨论。

关键词:地质灾害;风险评估;岩溶塌陷;GIS;贵州六盘水
中图分类号　P642.25　　**文献标识码**:A

1　概述

六盘水市位于贵州省西部,近20年来,随着六盘水市国民经济建设的发展,作为城市工农业和生活水源的地下水的开采日益强烈,诱发了严重塌陷问题,到目前为止,已产生塌陷坑1800余个,给人民生活及城市建设带来巨大影响。岩溶塌陷已成为城市发展面临的主要地质灾害问题,严重制约着城市的建设与发展。

六盘水市所在的水城盆地,是一个由德坞、水西、水城和塔山脚四个串珠状洼地组成,盆地长17 km、宽2~3 km,地势平坦,地面标高在1700~1800 m之间。

上覆第四系厚0.8~31 m,主要为黄褐色粘土、黑色亚粘土、灰黑色含砾粘土及淤泥。下伏基岩主要为石炭系灰岩,岩溶极为发育。

水城盆地是一完整的水文地质单元,汇水面积208 km^2。根据地下水的赋存条件、含水介质、水理性质和特征,可划分为岩溶裂隙溶洞水、基岩裂隙水和第四系孔隙水三大类型。

① **收稿日期**:2000-02-18
第一作者简介:雷明堂(1964—),男,博士,中国地质科学院岩溶地质研究所研究员,主要从事岩溶地质灾害防治研究工作。

万方数据

工作区岩溶水资源极为丰富,单位出水量可达 666～9600 m^3/d。由于岩溶发育相对均一,具有统一的地下水面,水力坡度为 1%～1.5%,流速 177.2～264.46 m/d,具层流特征。水位埋深 0.8～12 m,普遍具承压特性。

除了在三线建设期间做了大量的地质调查和水文地质勘探工作,80 年代,针对岩溶塌陷问题有关部门完成了一系列的塌陷调查研究工作,水城钢铁厂一直对其水源地的地下水开采情况和地下水动态进行了长期监测;1989 年,贵州环境地质总站开始进行 93 个监测点的地下水位、水质动态监测工作;这些工作无疑为本次评估工作提供了可靠的基础条件。

2　风险评估方法简介

2.1　采用软件

本次评估工作采用中国地质科学院岩溶地质研究所自行研制的岩溶塌陷灾害管理与风险评估系统(GMRS),该系统以商业 GIS 软件为基础进行开发,可对不同类型地质灾害数据进行可视化管理,并以此为基础,对潜在地质灾害的危险性及其可能给社会经济带来的风险进行评估。

2.2　网格单元的定义

工作采用 1:10000 地形图(六盘水市规划设计院提供)为基础图件,进行所有因素的专题图制作和数字化工作。受资料的影响,评估地区控制在水城盆地(图 1),高斯平面坐标为 Y=35477.00～35493.00、X=2938.00～2946.00,总面积约 25.92 km^2。为确保大多数与塌陷相关的地质和城市土地利用信息能编入图中,评估采用的网格单元(象元)定义为 10m×10m 分辨率,这样,所有专题图的象元数都将达到 800(行)×1600(列)=1280000 个。①

2.3　风险评估的过程

2.3.1　评估内容

评估内容主要有工作区今后发生岩溶塌陷的潜在危险性、工作区今后一旦发生岩溶塌陷,可能给社会带来的影响。具体包括:

(1)影响岩溶塌陷的地质因素分析。

(2)潜在塌陷危险性评价。

(3)社会经济易损性评价,考虑内容包括:

a. 社会敏感性(social susceptibility):岩溶塌陷可能造成的精神和物质生活的影响。

b. 经济易损性(economic vulnerability):岩溶塌陷发生时,可能造成的直接经济损失。

c. 社会基础结构易损性(social infrastructure vulnerability):岩溶塌陷发生时,地面设施发生破坏的可能性。

(4)风险数据的处理与风险评估

2.3.2　评估方法与步骤

(1)针对评估所考虑的因素,制作相应专题图,并进行数字化,通过 GMRS 的影响因素分析模块,转化为 GMRS 采用的数据格式。

(2)根据影响因素的取值,给专题图的象元赋值。

(3)建立潜在岩溶塌陷危险性预测评价模型。

---

① 作者提供的本文插图均为分辨率高的彩色图,因黑白印刷降低了图件的层次和分辨率,特此说明。—编者。

万方数据

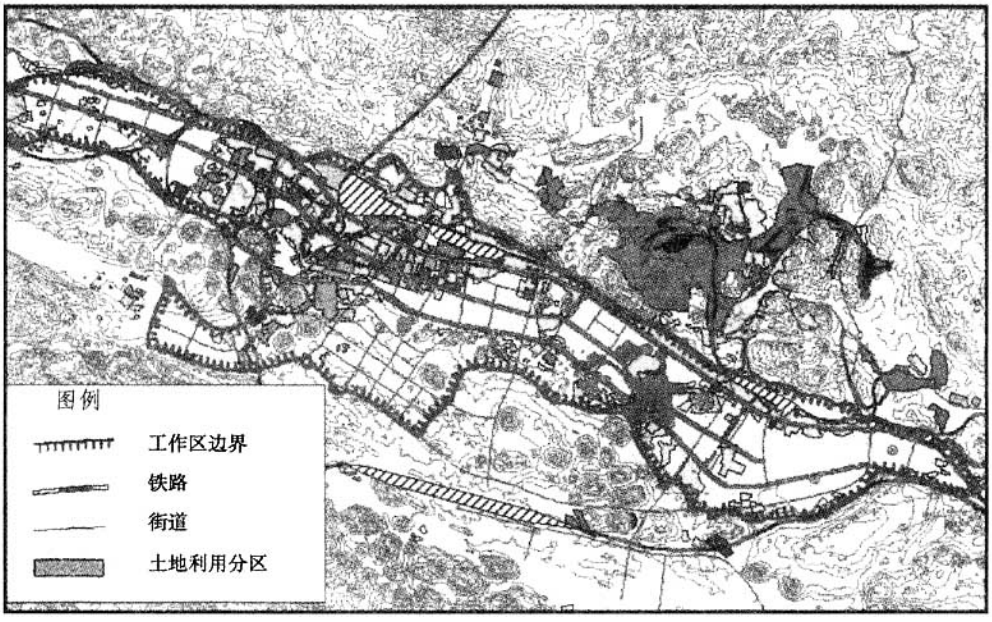

图 1 工作区位置图

Fig. 1 Location of the working area

(4)运用 GMRS 灾害危险性评估模块,评估发生岩溶塌陷的潜在危险性(可能性)。

(5)以土地利用现状和社会基础设施分布为基础,进行社会经济易损性评估。

(6)结合塌陷危险性和经济易损性,建立风险评估模型,运用风险评估模块,对工作区发生岩溶塌陷的风险进行评估,生成岩溶塌陷风险分区图。

3 岩溶塌陷潜在危险性评价(H－sinkhole)

结合已有岩溶塌陷的发育和分布特征,对主要影响因素进行综合分析、处理,建立塌陷发育的预测评价模型,对潜在塌陷的可能性进行评价。

3.1 主要影响因素分析

六盘水市的岩溶塌陷的主要影响因素包括水、土、岩以及人类活动四个方面。

3.1.1 地下水动力条件

研究结果表明,地下水动力条件对岩溶塌陷的发育有重要影响,地下水动力条件除受基础地质条件的影响外,还与地下水开采等人类活动有密切关系,在此,通过三个方面反映它对岩溶塌陷的影响。

地下水位　统计结果表明,绝大部分塌陷均分布在地下水降落漏斗之内,而且,越靠近漏斗中心,塌陷越多。在评估中,以 1992 年六盘环境地质监测站的 59 个点(30 个钻孔水位点、29 个泉点)为基础,生成工作区最高、最低地下水位等值线图,根据距降落漏斗中心的水位差的大小,赋值 0～10(表 1),生成影响岩溶塌陷的专题图 W－high92、W－low92。

地下水波动幅度　地下水位波动幅度是评价岩溶塌陷危险性的主要因素之一,评估中,由工作区 1992 年度最高、最低地下水位等值线图直接生成专题图 W－fluct92,波动幅度越大,象元值越大(表 1)。

万方数据

地下水水力特征　地下水水力特征直接反映地下水波动过程中的承压性,试验研究表明,地下水作承压～无压波动最有利于岩溶塌陷的发育,其次是承压波动、无压波动。在专题图(W－press92)中,根据这一规律,相应地区的象元分别赋值为 10、5、1(表 1)。

因素综合处理　采用加权平均法,对上述三因素进行综合处理,生成反映地下水动力特征的专题图(F－water),即:

$$F-water=(2*w-high92+2*w-low92+3*w-fluct+3*w-press)/10 \quad \cdots\cdots (1)$$

图 2 即为该模型的计算结果,专题图象元值在 0～10 之间,值越大,对塌陷的影响越大。

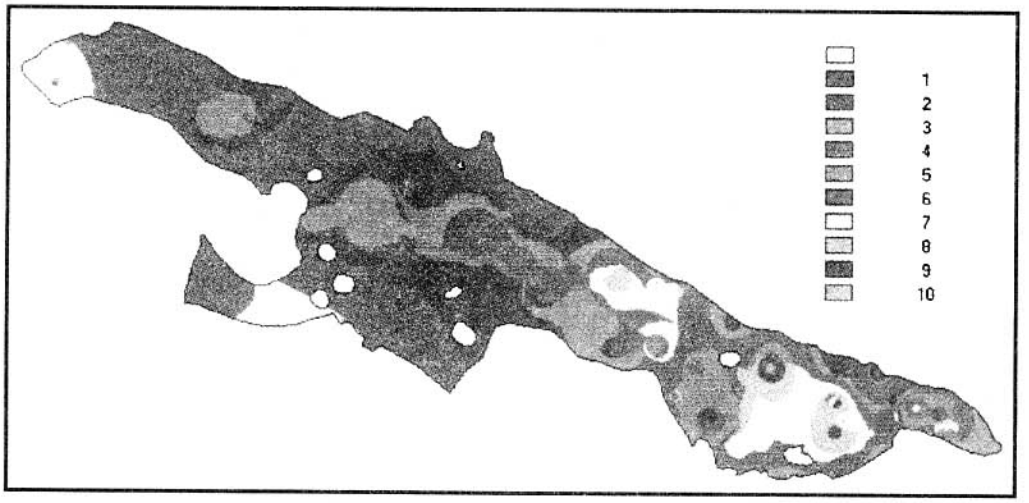

图 2　地下水动力条件综合分析结果

Fig. 2　Results of synthestic analyses of underground dynamic condition

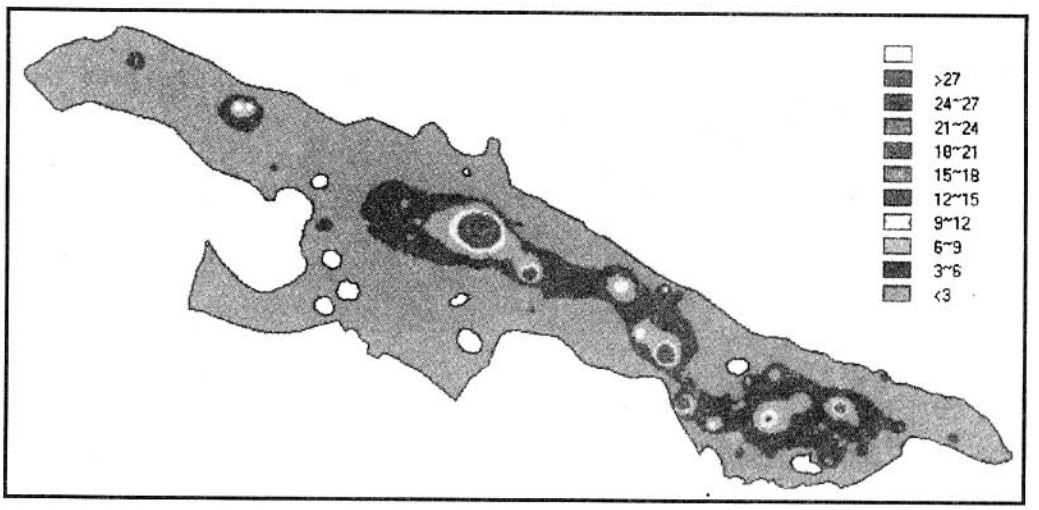

图 3　土层厚度

Fig. 3　Thickness of the soils

万方数据

表 1 主要影响因素分级表

Table 1. classification of main affection factors

分级	地下水动力条件			第四系		基岩岩溶	
	地下水降落漏斗(高)(标高 m)	地下水降落漏斗(低)(标高 m)	地下水波动幅度(m)	地下水水力特征	土层厚度(m)	岩溶发育特征(l/s.m)	断裂距离(m)
10	<1780	<1766	>17.5	承压~无压	<3	>31.5	<50
9	1780~1783	1766~1770	16~17.5		3~6	28~31.5	50~100
8	1783~1786	1770~1774	14.5~16		6~9	24.5~28	100~150
7	1786~1789	1774~1778	12.5~14.5		9~12	21~24.5	150~200
6	1789~1792	1778~1782	10.5~12.5		12~15	17.5~21	200~250
5	1792~1795	1782~1786	8.5~10.5	承压	15~18	14~17.5	250~300
4	1795~1798	1786~1790	6.5~8.5		18~21	10.5~14	300~350
3	1798~1801	1790~1794	4.5~6.5		21~24	7~10.5	350~400
2	1801~1805	1794~1800	2.5~4.5		24~27	3.5~7	400~450
1	>1805	>1800	<2.5	无压	>27	<3.5	>450

3.1.2 第四系土层条件

对岩溶塌陷有较大影响的土层特征主要有土层的结构、性质和厚度。由于资料的限制，在此仅考虑土层厚度的影响，在做专题图(F-soil)时，土层越厚，赋值越低(表 1、图 3)。

3.1.3 基岩条件

基岩特征包括岩溶发育和构造两个因素。

岩溶发育特征 由于缺少有关下伏基岩岩溶发育情况的资料，在此，以 50 个水位地质勘探点的抽水试验资料为基础，绘制等值线图，用单位涌水量及作成反映基岩岩溶发育程度的专题图(F-karst)，涌水量越多，岩溶越发育，所在象元的值越高(表 1)。

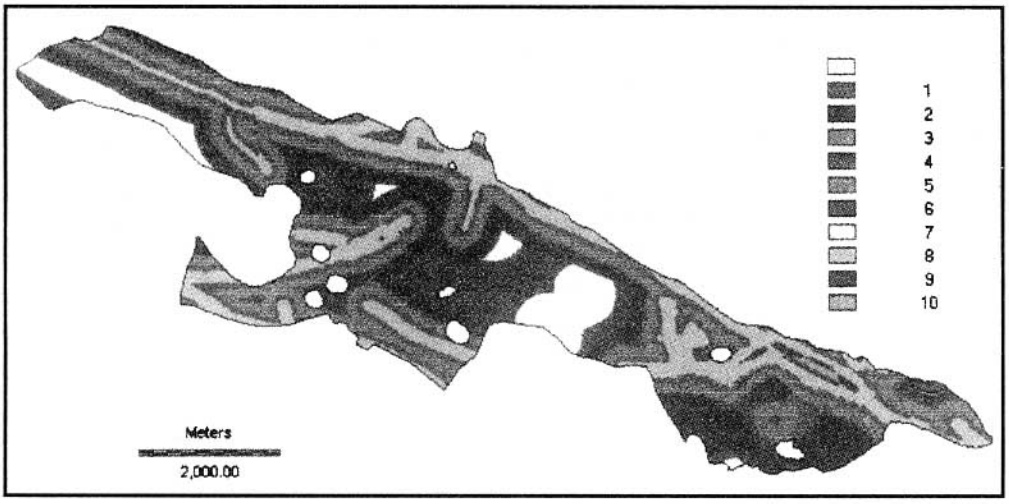

图 4 岩溶特征对塌陷影响

Fig. 4 karst characteristics vs. land collapses

构造因素 仅考虑断裂对塌陷的影响，通过对工作区 240 个塌陷的空间分布与断裂的关系分析，约 93% 的岩溶塌陷均分布在距离断裂 500 m 范围之内。为反映构造的影响，以构造分布图为基础，作成距离图，再根据距离越大，影响值越小的原则(表 1，大于 500 m

万方数据

赋值为 0),生成专题图(F－ault)。

因素综合处理　采用加权平均法,对上述二因素进行综合处理,作成反映基岩岩溶特征对塌陷影响的专题图(F－rock),即:

$$(F-rock)=(F-karst+fault)/2 \quad \cdots\cdots (2)$$

图 4 即为该模型的计算结果,专题图象元值在 0～10 之间,值越大,对塌陷的影响越大。

3.2　潜在塌陷危险性评价模型

潜在塌陷危险性评价就是对主要影响因素进行综合分析、处理的过程,考虑到本次评估中所收集的资料的影响,采用加权平均法进行建模,模型为:

$$H-sinkhole=(a*F-water+b*F-soil+c*F-rock)/m \quad \cdots\cdots (3)$$

式中,$m=a+b+c$

3.3　潜在塌陷危险性评价结果

在模型 3 中,取 a＝5、b＝3、c＝2,代入模型,获得反映潜在塌陷危险性的评价结果,该图象的象元值为 0～10,其中,0 代表非塌陷区(基岩裸露区),10 代表潜在塌陷最危险的地区,为使图象更加直观,对该图象进行重分区,而根据已发生的 240 个岩溶塌陷在不同危险区的分布情况,可以确定不同地区已有塌陷的分布概率(H－sinkhole),换句话说,该概率值也代表相应单元发生塌陷的可能性,表 2、图 5 为分区结果。

表 2　潜在塌陷危险性评价结果一览表

Table 2　Evaluation of potential collapse risks

	非塌陷区	低危险区	中等危险区	高危险区
原象元值	0	1,2,3	4,5,6	7,8,9,10
新象元值	0	1	2	3
面积(km^2)	0.46	0.61	16.17	8.68
塌陷个数	0	4	23	213
塌陷概率(%)	0	1.67	9.58	88.75

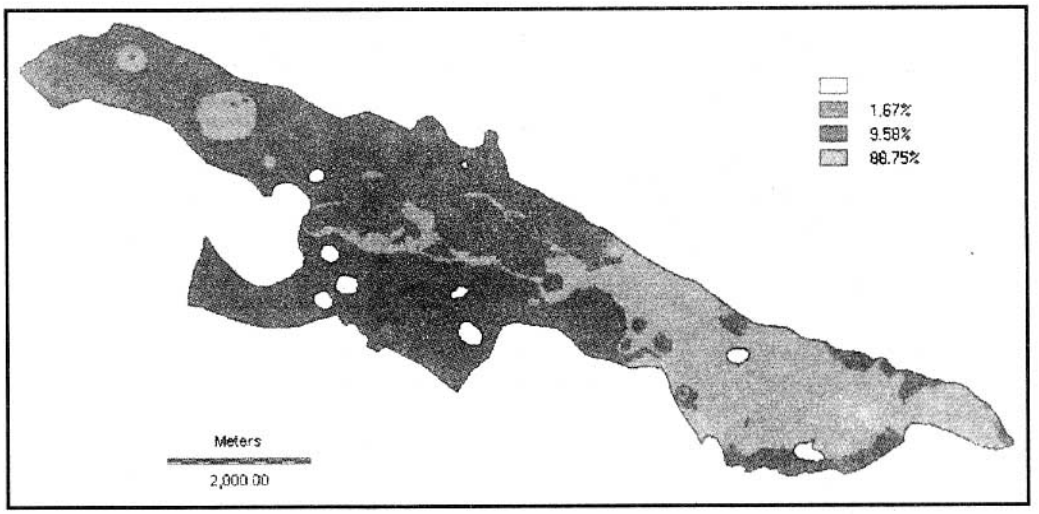

图 5　塌陷分布概率分区图

Fig. 5　gonation of possibility of collapse distrilution

万方数据

4 社会经济易损性评估

在社会经济易损性分析中，主要以土地利用要素分区为基础，考虑社会对塌陷的敏感性、社会基础结构的易损性以及经济的易损性。

一个地区的易损性随着人口、生命线网、民房、社区服务以及公共集会场所的增加而增加，随着减灾措施的增强而减少。

进行易损性评估前，首先根据六盘水市 1:10000 土地利用现状图、街道分布图、铁路分布图以及水域分布图，生成工作区社会经济与基础条件分区图(social，图 4)，图中铁路周围设缓冲区 10 m，主要街道设缓冲区 15 m，次要街道 10 m。然后，根据敏感性分析得到的各区敏感性数据，通过赋值命令，给该图的象元赋值，即获得社会经济易损性专题图。

4.1 社会敏感性评估(V－life)

评估岩溶塌陷可能给社会精神与物质生活带来的影响，主要从人口的密集情况、克服灾害的能力以及对整个社会的重要程度等方面考虑，赋值范围在 0～100%之间，值越大，表示敏感性越大。(表 3)

表 3 社会经济易损性取值一览表

Table 3 Social economic vuluerabilities

序号	类型	属性值	V－life	V－stru	V－eco (万元)	参考
1	居住用地	1	1	1	150	桂林中山南路塌陷
2	行政办公用地	2	0.9	0.2	500	
3	商业金融业用地	3	0.8	0.5	200	桂林体育场塌陷
4	文化娱乐用地	4	0.8	0.7	30	考虑地基处理
5	体育用地	5	0.6	0.4	10	考虑地基处理
6	医疗卫生用地	6	0.8	0.5	40	考虑地基处理
7	教育科研设计用地	7	0.9	0.4	50	考虑地基处理
8	特殊用地	8	0.4	0.5	200	
9	一二类工业用地	9	0.6	0.1	500	广西玉柴
10	三类工业用地	10	0.6	0.3	1000	广西玉柴、合山
11	仓储用地	11	0.4	0.8	5	
12	公共绿地	12	0.3	1	5	
13	生产防护用地	13	0.1	1	5	
14	对外交通用地	14	0.5	0.3	20	
15	市政设施用地	15	0.6	0.5	10	
16	村镇建设用地	16	0.8	0.9	100	柘木
17	耕地	17	0.1	1	10	
18	街道	18	0.8	0.6	10	
19	主干街道	19	0.9	0.3	50	
20	铁路	20	1	0.8	500	贵昆铁路
21	水域	21	0.2	1	100	考虑倒灌、污染

4.1.1 社会功能方面的考虑

以现有的土地利用分类为基础，人口集中的场所，如居住用地、教育科研设施用地、文化娱乐用地、商业金融业用地以及医疗卫生用地，敏感性值就比较高，为 0.8～1；社会重要性较高的场所，如行政办公用地、市政设施用地、工业用地和体育用地等，敏感性值也比较高，为 0.6～0.7；非建筑物分布区，如水域、耕地和绿地，敏感性指标最低，为 0.1～0.2。

万方数据

4.1.2　生命线的考虑

主要考虑交通线的敏感性。铁路是六盘水市与外界联系的最重要途径,如果发生破坏,将给社会带来重要影响,因此,周围设缓冲区 10 m,在该影响范围内,敏感性值取 0.9。工作区公路分主要街道和次要街道,主要街道因社会影响较大,敏感性值 0.8;次要街道 0.6。

4.2　**结构易损性评估(V－stru)**

目的是从基础结构的角度,评估不同土地利用要素的抗塌陷能力,以塌陷时发生破坏的可能性表示,取值在 0～100%之间。(表 3)

4.2.1　社会功能方面的考虑

尽管非建筑物分布区,如水域、耕地和绿地,对社会生活的影响不大,敏感性指标较低,但塌陷时发生破坏的可能性却很高,为此,结构易损性指标为 1;居住用地的抗塌陷能力也较弱,易损性指标为 0.9;而公共设施用地、工业用地等由于具有较好的基础结构,抗塌陷能力也较强,易损性指标为 0.1～0.5。

4.2.2　生命线的考虑

在缓冲区范围内,生命线抗塌陷能力均较差,所以,易损性指标取 0.4～0.6 之间。

4.3　**经济易损性评估(V－eco)**

目的是从国民经济和人民生命财产损失的角度,参考国内其它地区塌陷损失情况,评估塌陷发生时带来的损失,以万元为单位。(表 3)

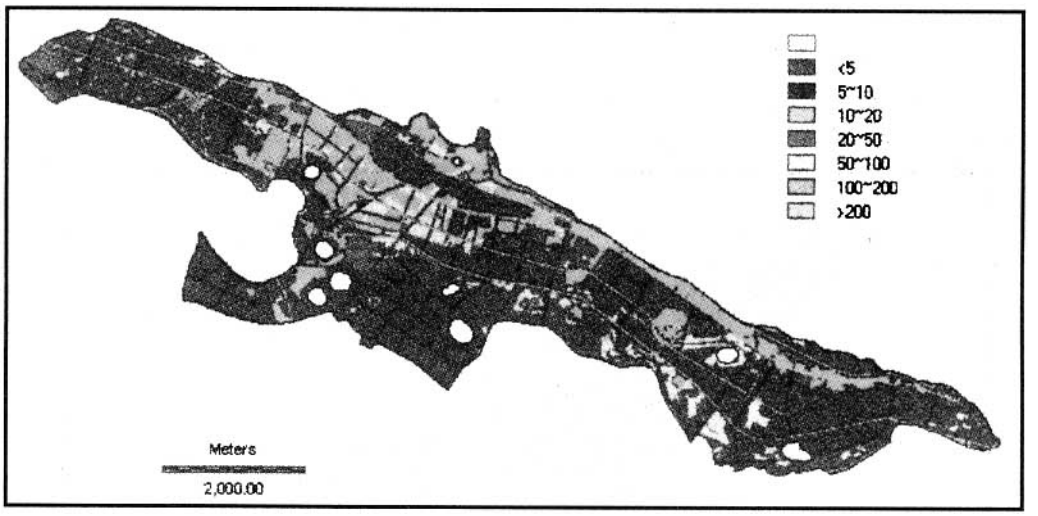

图 6　社会经济易损性分区(万元)

Fig. 6　gonation of social economic vulnerability

4.3.1　社会功能方面的考虑

可能造成较大经济损失的是行政办公用地、商业金融业用地、工业用地和居住用地等,易损性指标为 100～1000 万元;而耕地、绿地等损失最小,为 5 万元;其它类型用地均在 10～50 万元之间。

4.3.2　生命线的考虑

铁路因其重要地位,易损性值为 200 万元;主要街道为 50 万元、次要街道为 10 万元。

4.4　**易损性评估模型与评估结果**

为评估整个工作区的易损性(Vsocial),需对上述三方面要素进行综合处理,在此,采用

万方数据

直接相乘的方法，即：

$$V-social = V-life * V-stru * V-eco \quad (4)$$

由表 3 和模型 4 即可求出发生塌陷时，各土地利用单位的社会经济易损性，(图 6)。

5 岩溶塌陷风险评估

表示岩溶塌陷的社会风险信息的一个特别有效的手段是风险分区图。风险分区就是对工作区进行分带的过程，各分区都有特定的风险值。可以将岩溶塌陷的风险理解为在一定时期内，发生岩溶塌陷所造成可能损失，换句话说，岩溶塌陷风险就是在给定时间里，社会和经济的损失情况。通过风险分区图，可以方便快速地估计未来可能塌陷的位置、可能性、相对严重性，可以预计、减轻或避免潜在的损失。

5.1 风险评估模型

岩溶塌陷风险(R－sinkhole)是潜在塌陷危险性(H－sinkhole)和社会经济易损性(V－social)的函数，即：

$$(R-sinkhole) = f(H-sinkhole, V-social) \quad (5)$$

在本次评估中，选用以下模型进行：

$$(R-sinkhole) = H-sinkhole * V-social) \quad (6)$$

5.2 风险评估结果

风险分区图是风险评估结果的主要表达形式，据此，有关部门可以快速作出科学决策，以减少因岩溶塌陷所造成的损失。

将由模型 3 获得的潜在塌陷危险性评价结果(H－sinkhole)和由模型 4 得到的社会经济易损性评价结果(H－social)代入模型 6，即可得到工作区岩溶塌陷风险分区图，图 7。

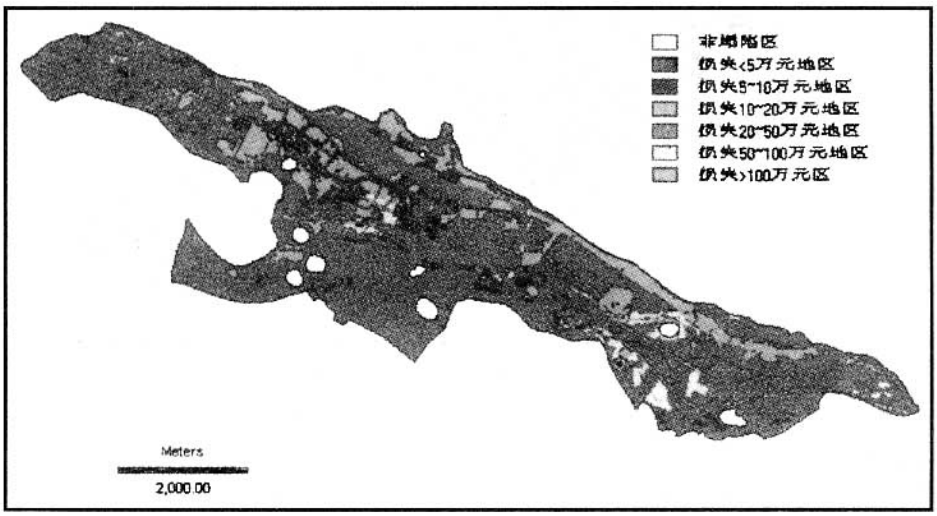

图 7 六盘水市岩溶塌陷风险分区图

Fig. 7 gonation of karst collapse risk of the city of Liupanshui

通过对风险分区图的分析，损失超过 100 万元的危险区面积有 1.19 km^2，主要分布在火车站、水城县城和花鱼洞一带，因为这些地区发生塌陷的可能性高，而且社会经济易损性也大；耕地等社会经济易损性较小的地区风险值均小于 5 万元。(表 4)

万方数据

表4 风险分区统计表

Table 4 gonation of lisks

属性值	风险	面积(km^2)	地理位置
0	非塌陷区	102.54	
1	损失<5万元地区	18.53	耕地
2	损失5-10万元地区	1.35	黄土坡一带
3	损失10-20万元地区	3.10	黄土坡大部分地区
4	损失20-50万元地区	0.41	军区体育场
5	损失50-10万元地区	0.85	官寨、水城四中、市一中、煤炭局
6	损失>100万元地区	1.19	火车站、水城县城和花鱼洞

4 结论

(1)城市地质灾害风险评估是广大环境地质工作者面临的新课题,以往的工作一般只进行发生灾害的危险性评价,对社会经济的影响考虑较少。

(2)城市地质灾害风险评估包括地质灾害危险性评价、社会经济易损性评价两大内容,危险性评价应以灾害发育的机理为基础,通过主要影响因素综合分析进行;易损性评价应包括社会敏感性、经济易损性和基础结构易损性三个方面,通过以土地利用要素分区为基础的社会功能分区进行易损性评估。

(3)地理信息系统(GIS)的推广和普及,为灾害的风险评估提供了极为有力的工具。

(4)灾害风险分区图是反映灾害风险评估结果的有效途径。

Risk assessment of karst collapses in Liupanshui, Guizhou, China

LEI Ming-tang, JIANG Xiao-zhen, Li Yu, ZHOU Li-xin

(*Instituti of Karst Geology, CAGS, Guilin*, 541004, *Chaina*)

GAO Jin-chuan

(*China University of Geoscience, Wuhan*, 430074, *China*)

Abstrace

Karst collapse, usually called as sinkhole, is a major geohazard in karst area, and is one of six primary gohazard types in China. Since the Regulation of Geohazard Prevention and Control is being implemented, risk assessment has become a problem facing to most researchers in this field. In the paper, through a case study in Liupanshui, Guizhou, the authors gave a detail about risk assessment of karst collapses. It is considered the assessment should include hazard assessment of potential sinkhole and evaluation of social economic vulnerability. All the work are finished by use of the GMRS, a Geohazard Management and Risk Assessment System (GMRS) based on GIS technology.

Key words: geohazard; risk assessment; GIS; sinkhole

万方数据