

崔玉良,王根厚,李志勇. 基于改进鱼骨模型的岩溶塌陷区风险评价:以柳州地区为例[J]. 中国岩溶, 2015, 34(1): 64-71.
DOI:10.11932/karst20150109

基于改进鱼骨模型的岩溶塌陷区风险评价 ——以柳州地区为例

崔玉良¹,王根厚¹,李志勇²

(1. 中国地质大学(北京),北京 100083; 2. 中国地质大学(武汉),湖北 武汉 430074)

摘要:文章以广西柳州地区岩溶塌陷区为研究实例,对研究区岩溶塌陷的主要影响因素进行了野外实地调查和分析。考虑了鱼骨模型中各要素之间的联系以及要素断裂的分级影响,建立了断裂的分级缓冲区,进而划分了五个综合要素图层,基于改进的鱼骨模型对各影响因素矢量数据格式的要素图层进行空间叠加分析,绘制出“柳州地区岩溶塌陷风险预测区划图”。由区划图可知,已发现的塌陷群75%以上均落在强风险与中等风险区内,强风险区和中等风险区总分布范围约为研究区总面积的一半,主要分布在柳州地区中南部,覆盖层厚度较薄,较容易发生岩溶塌陷。已发现塌陷群25%以下分布在弱风险区以及很弱风险区内,主要分布在柳州地区的北部和西部,发生岩溶塌陷的概率较小。建议城市规划和建设选择在很弱风险区和弱风险区进行。

关键词:柳州地区;矢量数据;空间叠加分析;分级缓冲区;塌陷风险评价

中图分类号:P642.26 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-4810(2015)01-0064-08

0 引言

对于岩溶塌陷的机理和影响因素,国内外学者进行了大量研究。溶洞、一定厚度的松散覆盖物及地下水的活动构成岩溶塌陷发生的主要条件^[1]。岩溶地面塌陷的形成是多种因素所致^[2-3],水文工程地质条件不同,岩溶塌陷致塌因素亦有别,且各个因素的影响权重也有所差异。然而,一些岩溶塌陷调查不结合地区实际,套用其他地区的研究成果,影响了塌陷的调查评价的准确性。结合区域水文工程地质特点,分析影响塌陷的关键因素,是岩溶塌陷调查的重要工作,也是对地区岩溶塌陷预测的基础工作。

前人^[4-14]对岩溶地区塌陷预测方法也提出了很多不同的观点和模型,这些观点归根结蒂是对岩溶影响因素以及各个因素权重选择的认识差异,而模型的建立也是基于对影响因素的分析。近年来,地理信息系统(GIS)技术、模糊数学理论、灰色理论和神经网络

等的应用,使得岩溶塌陷预测更趋科学化合理化^[15-21],但这些模型均有优缺点。例如:神经网络方法^[22-23]存在着难以克服的缺陷,在学习样本数量有限时,精度难以保证,学习样本数量很多时,易陷入“维数灾难”,泛化性能不高以及推广能力差等;灰色理论的准确性和使用的简便性尚待商榷;模糊理论存在着隶属度、权重难以确定的缺点;支持向量基模型^[24-25]虽然有效克服了前述常用模型的缺点,但其相关系数需要通过不断实验才能达到实际要求,该方法的算法亦较为复杂。这些岩溶塌陷预测模型能反映研究区的实际情况并具有一定的适用范围,但在推广性及应用的简易性上还存在不足。

此次笔者在详细收集塌陷地区野外资料的基础上,运用改进的鱼骨模型,充分考虑鱼骨模型中各要素之间的联系,将联系密切的因素进行合并,划分出五种不同的综合要素,并利用 mapgis 空间系统对要素图层进行空间叠加分析处理,实现对研究区的岩溶

基金项目:柳州市应用技术研究与开发项目“柳州市岩溶塌陷地震安全区划”

第一作者简介:崔玉良(1989-),男,研究生,主要研究方向构造地质学。E-mail:814399394@qq.com。

通信作者:王根厚(1963-),男,教授,博士生导师,从事构造地质学的教学、科研。E-mail:wgh@cugb.edu.cn。

收稿日期:2014-05-27

塌陷风险区划评价。研究结果为指导城市的总体布局,优先选择岩溶塌陷危险性较小的地段,避免高风险区等提供参考^[26]。

1 研究区地质背景和塌陷概况

1.1 地质背景

柳州地区北部发育近东西向弧形断裂系,向南过渡为北东向的断裂系,再向南过渡为北北东向的断裂系。这三组断裂系控制了研究区地貌发育及盆地展布(图1)。

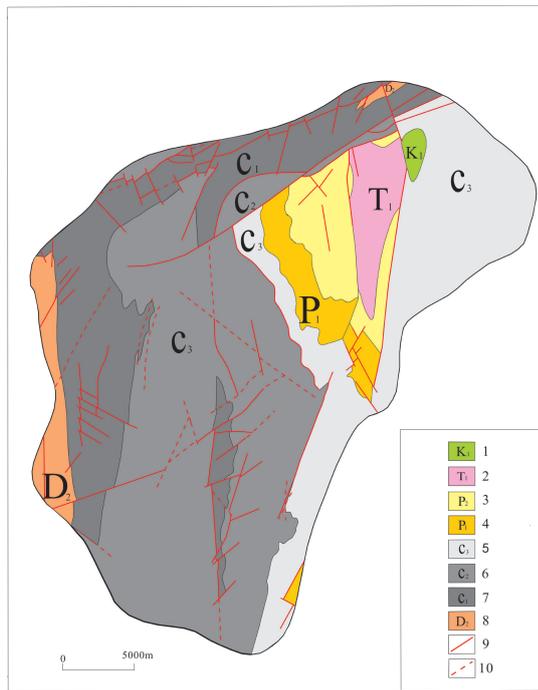


图1 柳州市地质图

Fig. 1 Geological map of Liuzhou city

1. 下白垩统砾岩、砂岩
2. 下三叠统泥岩
3. 上二叠统硅质灰岩
4. 下二叠统泥岩
5. 上石炭统灰岩、白云岩
6. 中石炭统厚层灰岩
7. 下石炭统灰岩、泥岩、砂岩等
8. 中石炭统灰岩
9. 实测断裂
10. 推测断裂

基岩岩性主要为一套古生代深海至浅海相地层建造,主要为石炭系的中厚层灰岩、白云质灰岩、白云岩,二叠系的薄层—中层灰岩、白云岩、白云质灰岩夹硅质岩以及中生代浅海相、滨海相和陆相沉积建造。三叠系以灰岩、泥灰岩、白云质灰岩为主。白垩系自上而下主要为紫褐色厚层状砾岩、紫红色中厚层状砂质泥质粉砂岩、泥岩、含砾砂岩或含砾石英砂岩。侏罗系以砂岩、粉砂岩、泥岩为主。其上被厚度在0~40 m之间的第四纪沉积物覆盖^[27],第四系按成因类型可分为冲积、洪积、冲洪积、残坡积和洞穴堆积。全新统冲洪积层分布于左江水系I级阶地及河漫滩上,

底部为砂砾层,中上部为砂层及粘土质砂层。残坡积层广泛分布,性状松散,以粘土为主。上更新统冲洪积层分布于II级阶地上,底部为卵石,上部为粉砂质粘土质。残坡积层分布于山麓斜坡地带,粉质粘土夹砾石,砾石分选性稍好,磨圆度差。洞穴堆积分布于最高层水平溶洞中。中更新统冲积层分布于III、IV、V级阶地,底部卵石,上部粘土。坡积层分布于III级阶地后缘斜坡、丘陵和平原地带,或相当于此高度的其他地貌单元上,以黄粘土或红粘土为特征。洞穴堆积分布于中、上层水平溶洞中。

1.2 岩溶塌陷概况

据初步调查,区内共发生塌陷(群)25处,塌陷坑124个。塌陷发生的时间,最早在上世纪50年代。总体上,人类建设活动区、地下水和地表水变幅较频繁区、公路和铁路两侧以及人类居住区岩溶塌陷发生的频率高并且强度大。

根据野外实地调查及室内资料分析表明,柳州市区覆盖岩溶区发生塌陷密度较大,达2个/km²,给人民群众安全带来极大威胁。由于人类工程活动的影响改变了塌陷的主控因素并造成塌陷日趋频繁,岩溶塌陷给西城区工农业生产、城市建设、及人民生命财产造成了严重损失。据不完全统计,每年因塌陷给西城区造成的直接经济损失达几十万至几百万元,严重制约着柳州市区的发展。

2 研究区塌陷影响因素分析

研究区内的岩溶塌陷,95%发生在松散沉积物覆盖地区,5%发生在基岩裸露区。故本文着重讨论松散沉积物覆盖地区的岩溶塌陷。

经调查,研究区内岩溶塌陷受诸多因素影响。松散沉积物覆盖是前提因素;土层厚度、岩性条件、岩溶条件、断裂发育程度是强度因素;地下水开采、降雨和地震为诱发因素。并且诸因素之间相互关联(图2)。

为突出主要影响因素,结合研究区的具体调查情况,并剖析诸因素之间的关系,采用空间统计方法,将具有显著正相关关系的影响因素合并为综合要素图层。

例如:研究区内岩溶与岩性关系密切,呈正相关。将钻探、物探、调查所得到的地下溶洞分布图通过计算机进行栅格化,将0.5 km×0.5 km尺寸网格化范围内的溶洞个数,称为遇洞空间指数,进行运算,得到遇洞空间指数图^[28],再叠加塌陷分布图和岩性分布图,二者的统计结果如表1所示;在区域上,岩性溶解度高的区域,岩溶越发育,塌陷密度越大。故将岩性和岩溶发育程度合并为一个综合要素图层。

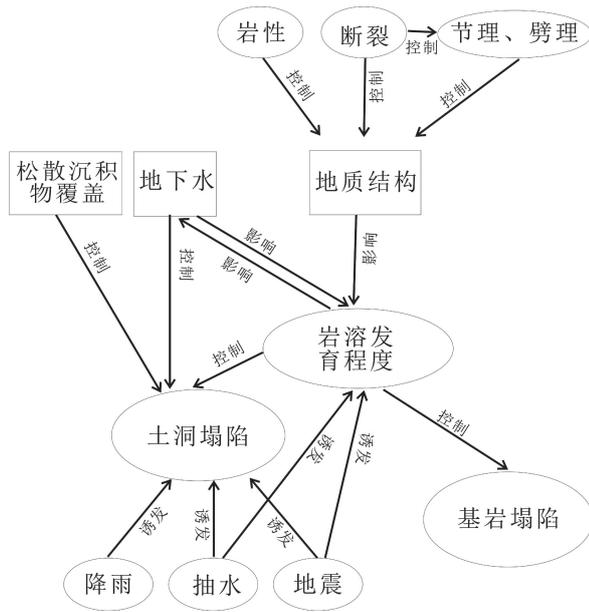


图2 岩溶塌陷影响要素关系图

Fig. 2 Relationship among factors influencing karst collapse

表1 地下岩溶发育程度与岩溶塌陷关系统计

Table 1 Relationship between of the underground karst development degree and karst collapse

岩性	岩溶发育程度	遇洞空间指数 /个/0.25km ²	塌陷个数	塌陷密度 /个/km ²
松散沉积物	微弱发育	2	9	2.47
白云岩组	中等发育	2~6	17	2.85
灰岩夹硅质和岩泥岩	比较发育	6~10	32	13.45
灰岩组	强烈发育	10~15	42	33.13

注:遇洞空间指数是指 0.5 km×0.5 km 范围内所遇到的溶洞个数。

另外,对一些因素做了剔除处理。例如:地震的发生具有不可预测性,无法参与评价工作;考虑降雨对整个研究区诱发岩溶塌陷的几率是均等的,且研究区主要受地下抽水的影响,降雨影响相对次要,也不参与评价。

3 评价方法

3.1 风险评价模型

前人应用的“鱼骨模型”^[29]未考虑因素间的相互影响,有些影响因素联系密切,可以划分为一个综合影响因素。本文采用胡瑞林等提出的“鱼骨模型”并考虑了因素间的相互关系划分出五种综合要素图层,并用“木桶模型”^[29]考虑各因素的权重大小。前提因子取最短板,为最大的风险因子,应占0.5(即50%)

的风险强度,剩下的0.5风险值将分配给其余两项风险因子。根据这两项因子的相对板长,将其中的2/5(0.2)分配给诱发因子,3/5(0.3)分配给强度因子。

根据前述研究区塌陷影响因素的分析结果,将有关风险因子、风险比值汇总于表2。

3.2 评价步骤

3.2.1 选择数据类型

矢量数据结构具有图像显示质量好,精度高的特点。但是矢量数据结构复杂,导致了操作和算法的复杂化。

栅格数据结构简单,定位存取性能好,可以与影像和DEM数据进行联合空间分析,数据共享容易实现,对栅格数据的操作比较容易。但是图像输出质量低,线条有锯齿,边界精度不高。

为提高图像输出质量,综合考虑两种数据结构的优缺点及软件功能,采用矢量数据结构的图层进行空间叠加分析。

3.2.2 空间数据叠加分析

magis软件中的空间分析子系统可对点、线、面进行合并、相减、相交和判别四种空间分析操作^[30]。

此次工作采用magis软件“空间分析”模块中的面与面合并和相减的空间分析操作(图3)。具体如下:

(1)矢量化好五幅要素图层,并对要素图层的区域赋相应的风险比值属性。

(2)对各个要素图层进行两两合并的空间操作。其中,断裂需要建立分级缓冲区。

(3)经空间合并分析的成果图件,每个区均有五项相应的风险比值属性,然后在图上对研究区划分出若干1km²方格。在每个方格中对这五项风险比值进行求和(若方格中存在两个或两个以上的拓扑区域,则按照各区面积所占比例对风险比值进行求和),得到每个方格区内风险比值之和即为该区的风险比值。

(4)得到一个合并了五种要素的区划图,然后依据风险比值的范围进行分区,并修改区颜色以进行区分。

3.2.3 要素图层

经野外详细调查研究,确定了研究区内断裂的影响范围。在室内对断裂以10m为增量建立多个缓冲区,再将岩溶塌陷点(群)投到各个缓冲区中,对落在缓冲区内的岩溶塌陷点(群)进行统计分析。经分析,断裂影响约550m范围内岩溶塌陷点(群)数约占总塌陷(点)群总数的50%,而以50m为半径的断裂缓冲区内岩溶塌陷点(群)几乎占到总数的25%(图4)。因此,经反复实验确定对断裂建立缓冲半径为550m和50m的缓冲区,再将550m和50m的缓冲区进行相

表 2 影响因素权重表
Table 2 Weights of influencing factors

风险因子	风险比值	风险要素	风险成分	风险比值
前提因子	0.5	覆盖型岩溶分布	有覆盖型碳酸盐岩分布	0.5
			无覆盖型碳酸盐岩分布	0
		覆盖层厚度	<10m (即无第四系沉积物覆盖)	0
			10~20m	0.05
20~30m	0.025			
强度因子	0.3	岩性及岩溶发育程度	>30m	0.0125
			厚层灰岩, 节理裂隙发育, 平均线岩溶率 3.97%	0.15
			厚层灰岩、含燧石灰岩, 平均线岩溶率 3.51%	0.05
		断裂发育程度	白云岩、白云质灰岩, 平均线岩溶率 2.93%	0.025
			泥岩、砂岩等非碳酸盐岩性	0
			≤50m	0.1
诱发因子	0.2	地下水开采程度	50~550m	0.05
			>550	0.025
			强开采区 (开采强度 ≥ 2000m ³ /(d·km ²))	0.2
			中等开采区 (开采强度 1000~2000 m ³ /(d·km ²))	0.1
			弱开采区 (开采强度 < 1000m ³ /(d·km ²))	0.05



图 3 评价流程图

Fig. 3 Flow chart of risk assessment

减的空间分析操作,得到以 50 m 为半径的缓冲区以及距断裂 50~550 m 的缓冲区,两级缓冲区内的塌陷比例约为 1 : 1。相同塌陷比例下,50~550 m 的缓冲区面积较 50 m 缓冲区大很多,故所赋予的强度因子较小。通过此方法来实现分级缓冲区的建立。最后对两级别的缓冲区附相应的风险比。

根据野外实际调查及参考相关的地质资料绘制出松散层覆盖分区图(图 5)。根据模型,碳酸盐岩之上有松散层覆盖的分布范围占有 0.5 的风险强度。

在研究区内均匀分布有 70 多个地质调查点,每个点均有松散层厚度值。基于这些数据并结合所搜集的前人对研究区有关第四系调查研究的资料,经软件插值绘制出松散层覆盖厚度分区图(图 6)。

基于前人钻探、物探、调查所得到的地下溶洞分布图,据前述遇洞空间指数进行划分网格打分,并用软件进行插值绘制出岩溶发育分区图(图 7)。该图划分出四个等级,每个等级赋予不同的风险强度值。

地下水开采程度分区图是在搜集前人关于地下

水开采方面的资料绘制出的,其分区是根据每平方米每天开采地下水的体积量确定的。开采强度 ≥ 2 000 m³/(d·km²)的区域划为强开采区,开采强度 1 000 ~ 2 000 m³/(d·km²)的为中等开采区,开采强度 < 1 000 m³/(d·km²)为弱开采区(图 8)。每个区赋予不同的风险强度值。

4 结果与分析

将得到的每个方格区的风险比值进行数据统计分析,可得到一定的规律。如图 9 所示,风险比值以 0.5 为分界线,两侧的数值近似呈正态分布,图中左侧的正态分布峰值分布在风险比值 0.05~0.2 之间,面积个数的峰值为 172 个;图中右侧的正态分布的峰值分布在风险比值 0.75~0.85 之间,面积个数峰值的为 483 个。图中所出现了两极分化的情况是合理的,因为有覆盖层为前提因子,必须满足这一条件,岩溶区才有发育塌陷的可能,所占权重最高,为 50%,

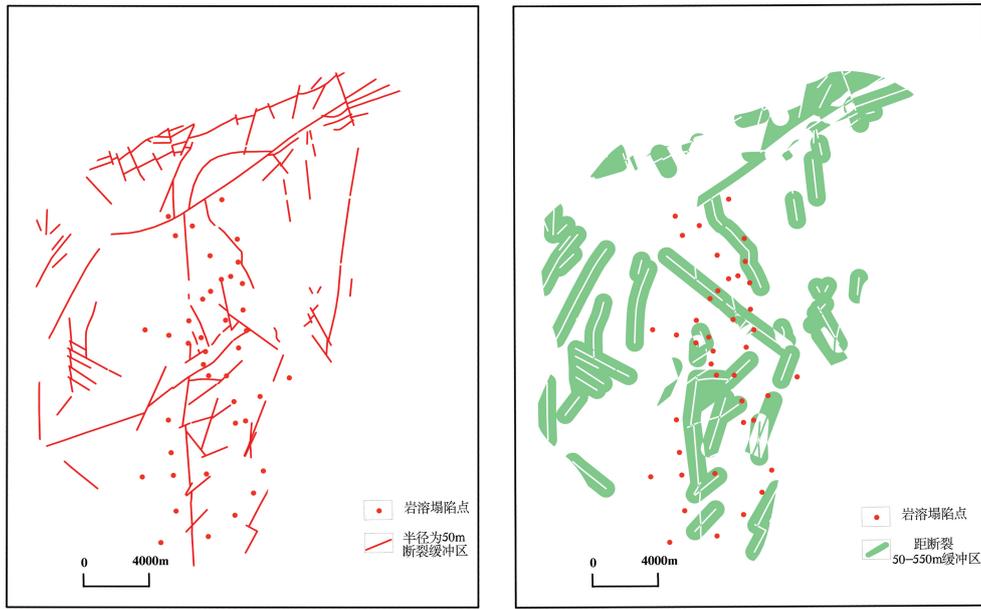


图 4 以 50 m 为半径的断裂缓冲区和以 50~550 m(即 500 m)为半径的断裂缓冲区与岩溶塌陷点(群)关系图

Fig. 4 Relations between 50m radius fracture buffer, 50—550m(i. e. 500m) radius fracture buffer and karst collapse point(s)

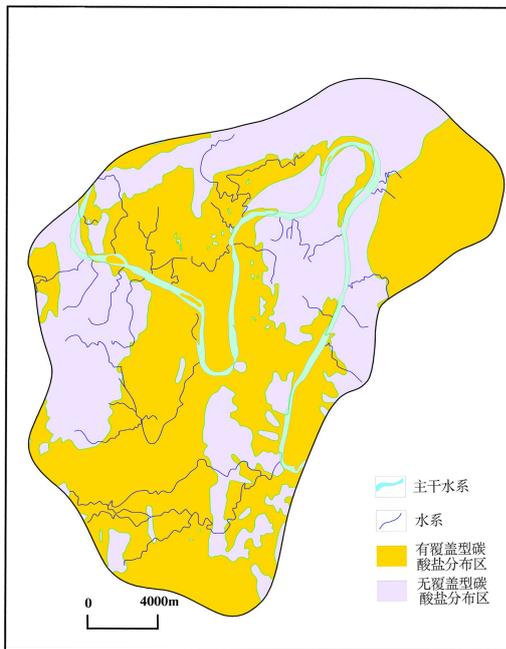


图 5 松散层覆盖分区图

Fig. 5 Zoning map of loose layer cover

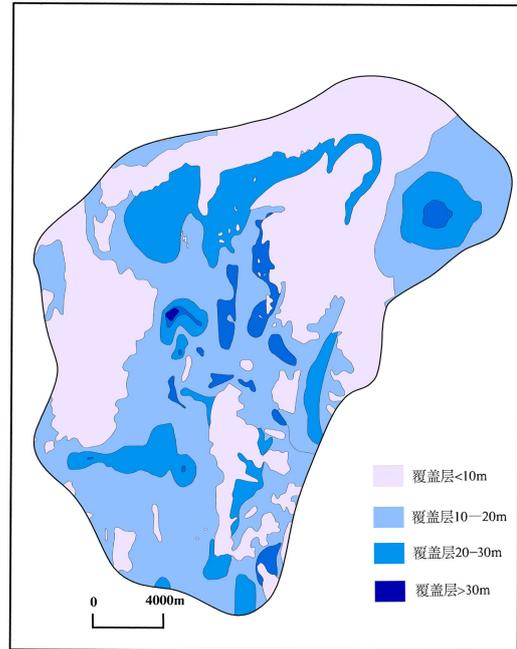


图 6 松散层覆盖厚度分区图

Fig. 6 Zoning map of cover thicknesses of loose layers

所以有覆盖物和无覆盖物的区域构成了两级分化的情况。也正因如此,风险比值只有大于 0.5 才有发育岩溶塌陷的可能,故将 0~0.5 划分为很弱风险区;图 9 中右侧风险比值近似正态分布,根据图 9 中各比值

的面积划分个数的总数主要集中在 0.7~0.85 之间,并考虑将风险比值近似等间隔划分,因此以此为界进行划分,确定出风险程度为很弱、弱、中等、强的范围分别为:0~0.5,0.5~0.7,0.7~0.85,0.85~1。

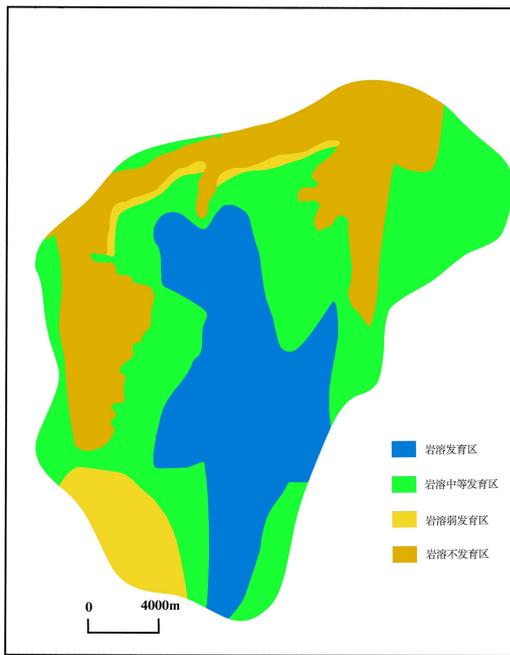


图 7 岩溶发育程度分区图

Fig. 7 Zoning map of karst development degrees

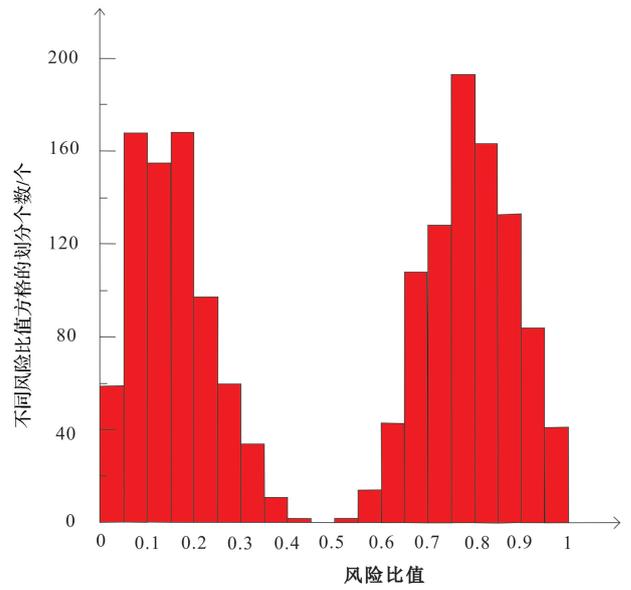


图 9 风险比值数据柱状图

Fig. 9 Histogram of risk ratio data

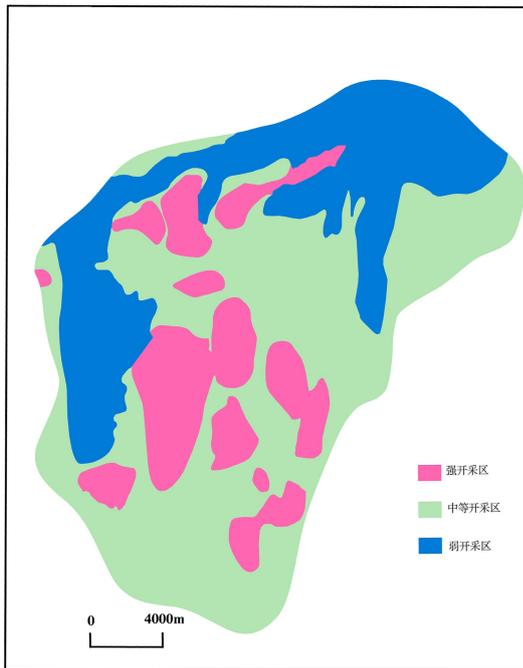


图 8 地下水开采程度分区图

Fig. 8 Zoning of groundwater exploitation degrees

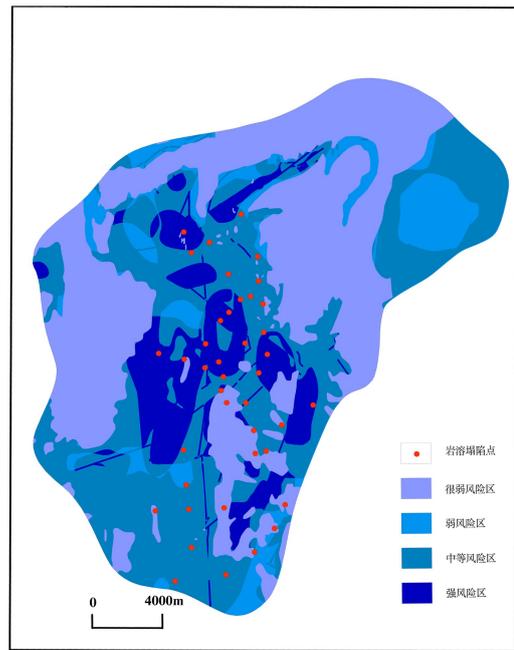


图 10 柳州地区岩溶塌陷风险预测区划图

Fig. 10 Zoning map of risk prediction on karst collapse in the Liuzhou area

表 3 各风险等级面积及比例

Table 3 Areas and proportion for different degrees of karst collapse risk in Liuzhou

塌陷风险等级	面积/km ²	比例/%
很弱风险区	186.833	37.5
弱风险区	62.275	12.5
中等风险区	99.644	20.0
强风险区	149.466	30.0

按照前述评价过程对柳州市的岩溶塌陷区域风险程度进行评价,评价面积约 498.22 km²,评价结果也为 498.22 km²(图 10、表 3)。岩溶主要分布在石炭纪灰岩地层中。很弱风险区存在 7 个岩溶塌陷点,该区分布范围较广,占评价总面积的 37.5%,主要分

布在柳州东部、北部以及西部地区,为泥岩、粉砂岩及少部分碳酸盐岩组成,该区的塌陷发育在灰岩基岩中,上面无覆盖层;弱风险区存在4个岩溶塌陷点,该区分布范围较小,占12.5%,主要分布在研究区东北部;中等风险区面积占20%,存在13个岩溶塌陷点,主要分布在研究区中南部,地震动荷载下对工程建筑破坏性较强,同时在该区已发生的岩溶塌陷较多;强风险区面积占30%,存在17个岩溶塌陷点,主要分布在研究区中部,地震动荷载下对工程建筑破坏性强。强风险区分布有大量的工厂、企业及居民,对地下水抽取量巨大,同时在该区已发生的岩溶塌陷多,是地震动荷载下可能发生岩溶塌陷的重点区域。因此,城市规划应该选择在很弱风险区以及弱风险区进行。

5 讨论

(1)岩溶塌陷尽管受多种因素影响,难以准确预测,但是如果能够深入调查研究各个影响因素之间的联系以及与岩溶塌陷的关系,就不难使用诸如风险评价等方法对其区域风险性作出基本估计,从而为城市规划或工程建设布局提供有力依据。改进后的鱼骨模型和木桶模型联合应用,考虑了因素间的相互联系,合并联系紧密的因素,同时定量地考虑断裂对岩溶塌陷的影响,有效地反映风险因素对于区域风险的综合效应,是一种可信的、值得推广的方法。此外,本文采用 mapgis 空间分析系统,对各个矢量化的风险要素图层进行区对区合并空间叠加分析,既能较栅格数据叠加分析得到更准确的结果,又能较快速地完成任务。

(2)岩溶塌陷模型因子值大小的确定还存在主观性,还需要对评价模型作进一步研究,使影响因子值更加客观。本文在建立断裂缓冲区时,未考虑断裂是否是活动断裂——活动断裂对岩溶塌陷的影响较不活动断裂要大。因此,建议对研究区内断裂进行详细调查。需要强调的是,由于不同地区客观条件不同,选择影响因子及确定因子值时不应照搬文中的固定模式,需要进行一些统计试验,得到符合本地区的因子种类及因子值。

6 结论

(1)岩溶塌陷强风险区面积占30%,主要分布于柳州地区中部;中等风险区面积占20%,主要分布在柳州地区中南部。强、中等风险区覆盖层厚度较小,

岩性主要为中厚层灰岩,地下水位埋深浅,地质构造发育,构造活动性强,已知塌陷点分布较多,地震动荷载下最容易发生岩溶塌陷。

(2)岩溶塌陷弱风险区面积占12.5%,主要位于柳州地区东北部;很弱风险区面积较大,占研究区面积37.5%,主要分布在柳州的东部、北部和西部。

(3)已发现的塌陷群75%以上均落在强风险与中等风险区内,因此,改进后的“鱼骨模型”以及矢量数据叠加的方法能较好地柳州地区进行岩溶塌陷风险区划。

致谢:感谢中国地质大学(武汉)李志勇老师和广西地震局李细光老师在研究和撰文过程中给予的启发和帮助,感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见。

参考文献

- [1] 苏阳,曾克强,陈孟芝. 桂林市岩溶土洞塌陷的形成机制及治理措施[J]. 矿产与地质, 2007, 21(6): 692—694.
- [2] 董兆祥,雷霆,赵文强,等. 应用直接测氦法对唐山岩溶塌陷的测试研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1997, 8(4): 28—32.
- [3] 万继涛,杨蕊英,李公岩,等. 山东省枣庄市市区地质灾害防治规划[J]. 地质灾害与环境保护, 2003, 14(3): 61—68.
- [4] 赖永标,乔春生. 基于支持向量机岩溶塌陷的智能预测模型[J]. 北京交通大学学报, 2008, 32(1): 36—39.
- [5] 包惠明,胡长顺. 岩溶地面塌陷神经网络预测[J]. 工程地质学报, 2002, 10(3): 299—304.
- [6] 陈静,马亚杰,朱庆杰. 人工神经网络模型在岩溶塌陷安全评价中的应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2005, 16(2): 139—142.
- [7] 谭树增,秦云虎. 模糊数学法在岩溶地面塌陷危险性评估中的应用[J]. 能源技术与管理, 2009(6): 30—32.
- [8] 包惠明,胡长顺. 岩溶塌陷两级模糊综合评判[J]. 水文地质工程地质, 2001(3): 49—52.
- [9] 全望久,方星. 铜陵小街地区岩溶塌陷模糊综合评判[J]. 中国岩溶, 1992, 11(4): 17—20.
- [10] 项式均. 岩溶塌陷灾害的预测和评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1990(1): 30—36.
- [11] 地矿部岩溶所. 桂林环境工程地质[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988: 30—121.
- [12] 缪钟灵,宗凤书. 桂林岩溶塌陷风险评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1995(2): 38—40.
- [13] 雷明堂,蒋小珍,李瑜,等. 湘潭市岩溶塌陷的综合预测与评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1997(S1): 69—77.
- [14] 王洪涛,王恩志,范建明,等. 岩溶塌陷区划的选置分析方法和宏观减灾对策研究[J]. 长春地质学院学报, 1996(3): 336—341.
- [15] 郭庆海,刘文,胡群芳,等. 盾构施工对沥青路面影响评估[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2004, 25(3): 70—73.
- [16] 陈龙. 城市软土盾构隧道施工期风险分析与评估研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.
- [17] 陈龙,黄宏伟. 软土盾构隧道施工期风险损失分析[J]. 地下

- 空间与工程学报,2006,2(1):74-78.
- [18] Peck P B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]// Mexico; Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State-of-the-Art Volume, Department of Transportation Federal Highway Administrator,1969:225-290.
- [19] Loganathan N, Poulos H G. Analytical Prediction for Tunneling Induced Ground Movements in Clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(9): 846-856.
- [20] 中华人民共和国交通部.公路沥青路面养护技术规范(JTJ073.2-2001)[S].北京:人民交通出版社,2001.
- [21] Whitman R V. Organizing and Evaluating Uncertainty in Geotechnical Engineering [J]. Journal of Geotechnical Engineering,2000,126(7):583-593.
- [22] 朱庆杰,苏幼坡.基岩条件对地震影响系数的影响[J].岩土工程学报,2004,26(2):198-201.
- [23] 焦李成.神经网络及其应用[M].西安电子科技大学出版社.西安,1996:20-28.
- [24] Vladimir N Vapnik. The Nature of Statistical Learning Theory[M]. NY:Spring-Verlag,1995.
- [25] Gunn S R. Support Vector Machines for Classification and Regression[R]. University of Southampton,1998.
- [26] 雷明堂,蒋小珍,李瑜.岩溶塌陷试验、评估与管理方法研究[J].地质灾害与环境保护,2002,13(1):18-22.
- [27] 广西石油地质大队区调分队.柳州市区域地质调查报告[R].广西壮族自治区地质矿产局,1988.
- [28] 冯佐海,李晓峰,梁金城.岩溶塌陷空间指数等密图的编制及意义[J].中国岩溶,1999,18(3):276-279.
- [29] 胡瑞林,王思敬,李焯芬,等.唐山市岩溶塌陷区域风险评价[J].岩石力学与工程学报,2001,20(2):180-189.
- [30] 吴信才. MAPGIS 地理信息系统[M].北京:电子工业出版社,2004:191-194.

Risk assessment of karst collapse areas based on the improved fish bone model: An example of the Liuzhou area in Guangxi Province

CUI Yu-liang¹, WANG Gen-hou¹, LI Zhi-yong²

(1. China University of Geoscience(Beijing), Beijing 100083, china; 2. China University of Geoscience(Wuhan), Hubei Wuhan 430074, China)

Abstract: Taking the karst collapse area in Liuzhou of Guangxi as an example, this study conducted field investigations and analysis to the major controlling and influencing factors of the karst collapse. Considering the relationship of these factors in the fish bone model and the grading influence of fractures, we established the grading buffers of fractures, and thus determined five feature layers of those comprehensive factors. Based on the improved fish bone model, we made spatial overlay analysis on the feature layers of each factor's vector data format, and prepared a zoning map of the risk prediction. It is shown that more than 75% of the discovered collapse groups fall in the areas with a high risk or a moderate risk, which approximately account for half of the total research areas and are mainly located in the central and southern portions of the study area. These areas have thin covers, and frequent karst collapse is common. Less than 25% of the discovered collapse groups are in the areas with a low risk or a very low risk, which are mainly distributed in the north and west of the study area. Urban planning and construction should select those areas with a low risk or a very low risk. This study has effectively predicted the risk of karst collapse in Liuzhou city.

Key words: Liuzhou area; vector data; spatial overlay analysis; graded buffer of fracture; risk assessment of karst collapse

(编辑 吴华英)