

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2017.01.19

广西北部湾经济区台风暴雨引发的地质灾害风险评价

曾维刚, 吴 福

(广西地质环境监测总站, 广西 桂林 541004)

摘要: 台风暴雨是诱发广西北部湾经济区地质灾害的重要因素, 通过对影响地质灾害发育程度的地层岩性、力学性质、断裂构造、人类工程活动、降雨、坡度、地形起伏度等因素的量化解析, 划分地质灾害易发区。统计分析地质灾害专业监测数据, 取得诱发地质灾害的有效雨量、临界有效雨量等参数, 以此构建地质灾害风险评价模型。经验证, 该模型有一定的时效性, 可以在北部湾经济区地质灾害预警预报工作中提供一定的基础及应用。同时可以为经济区工程建设提供部分参考。

关键词: 量化解析; 有效雨量; 临界有效雨量; 专业监测数据; 风险评价

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2017)01-0121-07

Risk assessment on geological disaster caused by typhoon and rainstorm in Beibu gulf economic zone of Guangxi zhuang autonomous region

ZENG Weigang, WU Fu

(Guangxi Geological Environment Monitoring Station, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: Typhoon and rainstorm are the important factors in evoking geological disasters in Guangxi Beibu Gulf Economic Zone. Through quantitative analysis on those affecting the development of geological hazards such as formation lithology, mechanical properties, fracture structure, human engineering activities, rainfall, slope, relief of topography, etc., geological hazards prone areas are able to be divided and identified. In order to building a risk assessment model of geological disasters, statistical analysis of professional monitoring data of geological hazards and obtainment of effective rainfall, critical effective rainfall as well as other parameters are necessary. Proven that it has a certain timeliness, the model can help provide certain basic applications in warning and forecasting geological disasters for Beibu Gulf Economic Zone. Meanwhile, it can be applied into the construction of economic zone for reference.

Keywords: quantitative analysis; effective rainfall; the criticality of effective rainfall; professional monitoring data; risk evaluation

0 引言

广西北部湾经济区(下称经济区)地处北部湾北部, 每年都有台风暴雨发生, 诱发了数量较多的地质灾害。随着经济区整体定位的提升, 经济的快速发展, 加

剧了经济区地质环境问题和增高地质灾害的发生风险, 研究台风暴雨诱发经济区地质灾害发生的规律, 进而构建相关风险评价系统, 对维护人民生命和财产安全具有一定的意义。

收稿日期: 2016-07-15; 修订日期: 2016-08-04

基金项目: 广西科学研究与技术开发计划项目北部湾经济区特殊气象条件下(台风、风暴潮、暴雨)地质灾害防治研究(桂科攻0992027-7)

第一作者: 曾维刚(1967-), 男, 广西人, 高级工程师, 主要从事水工环地质工作。E-mail: zengwg@163.com

1 经济区基本概况

经济区包括南宁、北海、钦州、防城港等四个地级市所辖行政区划范围,地理坐标:东经 $107^{\circ}19'36'' \sim 109^{\circ}51'56''$,北纬 $20^{\circ}54'16'' \sim 24^{\circ}02'05''$,土地面积 $4.25 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

北部湾经济区依山傍海,总的地势由北向南逐渐降低,从最北面的低中山——丘陵地形逐渐过渡为低山台地进而为滨海平原(地面高程多为 $0 \sim 200 \text{ m}$)。区内有大明山、十万大山、云开大山等山脉。构造上属南华准地台的桂中—桂东台陷、云开台隆、右江再生地槽、钦州残余地槽、北部湾拗陷构造单元,以断裂为主,走向主要为北东-南西向,其次为北西及近东西向。经济区出露了寒武系-第四系的所有地层,以寒武系、志留系、泥盆系、石炭系、三叠系及侏罗系分布最广。

自 2003 年起,广西地质环境监测总站完成了经济区内所有县(市)1:10 万地质灾害调查与区划工作,2008~2015 年,广西地质环境监测总站完成经济区内浦北县、灵山县、宾阳县、横县 1:5 万地质灾害详细调

查。基本查明了经济区的地质灾害发育现状、规模、分布特征。经统计,经济区内各市地质灾害发生数量:钦州市 2 160 处,北海市 149 处,防城港市 300 处,南宁市 1 194 处;其中灾害隐患点 2 370 处,重大地质灾害隐患 179 处。

为有效防治地质灾害,在上级主管部门广西区国土资源厅的大力支持下,广西地质环境监测总站 2008 年启动了地质灾害自动专业监测站建设。在经济区浦北县官垌小学、灵山县丰塘中学等地质灾害隐患点边坡上建立了 26 处实时雨量、边坡土体含水率监测点。26 处监测点当中有 10 处设立在花岗岩风化层边坡,6 处设立在碎屑岩坡残积层边坡,4 处设立在红层碎屑岩坡残积层边坡,1 处设立在碎屑岩夹碳酸盐岩坡残积层边坡,4 处设立在碳酸盐溶余堆积层边坡,1 处设立在第四系粘土砾石层当中,覆盖了经济区内主要边坡类型。监测数据通过中国电信 GPRS 网络发到广西地质环境监测总站中心机房,为地质灾害气象预警预报服务。这些监测数据成为地质灾害成因分析的重要基础(图 1)。



图 1 广西地质灾害专业监测网络数据平台

Fig.1 The professional geological hazards monitoring network data platform of Guangxi

2 地质灾害易发程度分区

地质灾害风险评价的基础首先是划分评价区的地质灾害易发程度。影响经济区地质灾害发育的主要因素有地层岩性、断裂构造、人类工程活动、降雨、坡度、地形起伏度^[1]。利用 ArcGIS 软件平台将地层岩性、断裂构造、坡度、地形起伏度等地质环境背景因素,强降雨、村庄建设、道路建设、采矿活动等地质灾害发生的

诱发因素进行解析。

(1) 地层岩性

将经济区内花岗岩、石英闪长岩、千枚岩、片岩、砾岩、砂岩、石英砂岩、硅质岩、泥质砂岩、页岩、泥岩、钙质砾岩、砾岩、砂岩、石英砂岩、泥质砂岩、页岩、泥岩、不分类的黏土岩、石灰岩、白云岩、泥灰岩等 22 种主要岩类划分其在不同地层中的比例,并计算其力学强度及软化系数。

(2) 断裂

断裂构造切割、挫动地层,控制岩石节理裂隙的密度与展布,导致岩石的风化破碎,因此是影响地质灾害发生的一个重要因素。北部湾经济区断裂按照其规模分为普通断裂和深大断裂,普通断裂一般影响范围 1~5 km,深大断裂一般影响范围 5~30 km。根据其分布,取最大影响范围。计算其影响程度及两种断裂加权影响程度及范围。

(3) 地形地貌因素

地形坡度、曲率对斜坡应力分布、地表水径流与冲刷、地下水、松散物质堆积及植被分布等具有影响。

(4) 人类工程活动解析

人类工程活动是诱发地质灾害的重要因素,其中影响较大的是农村削坡建房、不进行边坡处理的县乡级公路及其等级以下道路建设工程、采矿活动。根据 2014 年北部湾经济区自然村、矿山及县、乡道路工程现状,分别计算绘制北部湾经济区村密度、矿山密度图、道路密度图。以上数据是进行概化解析,与实际情况有一定的出入。这里引入分辨率为 8 m 的绿色光谱卫片,作为地表植被破坏,即人类工程活动强弱的指标。

(5) 降雨

降雨是诱发滑坡、崩塌地质灾害的主要因素。特别是超常强度降雨最易导致群发性的崩塌、滑坡、泥石流地质灾害。受北部湾经济区南部易受台风暴雨影响,根据经济区各地降雨量数值,计算绘制年均降雨量及月均降雨量分级图 以上图件解析的栅格尺度为 15 m×15 m。

将以上各因素分别与崩塌、滑坡、泥石流地质灾害密度进行矩阵相关分析。计算公式:

$$r = \frac{\sum (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum (O_i - \bar{O})^2 \times \sum (P_i - \bar{P})^2}} \quad (1)$$

式中: r ——相关系数;

O_i ——A 栅格单元矩阵样本值 $O_1、O_2、O_3、\dots、O_n$;

P_i ——B 栅格单元矩阵样本值 $P_1、P_2、P_3、\dots、P_n$;

$\bar{O}$ ——A 栅格单元所有样本均值;

$\bar{P}$ ——B 栅格单元所有样本均值。

按照公式(1)通过崩塌(危岩)、滑坡、泥石流地质灾害与以上不同因子之间的两两计算,计算结果见表 1。

表 1 各影响因子与经济区崩塌、滑坡、泥石流
地质灾害密度相关系数表

Table 1 The influence factors and the correlation coefficient
of the geological hazards density of collapse, landslides
and debris flows in Economic Zone

一级计算 因子	一级计算 因子代号	二级计算 因子	二级计算 因子代号	计算因子 最大值	系数(K)
人类工程 活动	RI	村屯	CT	4 081 990	0.078 9
		道路影响	DL	108 150	0.017 6
		矿山	KS	8.490 49	0.001 2
		千枚岩	QM	40	0.000 01
		片岩	PY	20	0.000 01
		红层钙质砾岩	HGL	10	0.009 8
		砾岩	LY	100	0.001 4
		红层砾岩	HLY	90	0.000 01
		泥岩	NY	80	0.000 01
		红层泥岩	HNY	60	0.000 01
岩性	YX	泥质砂岩	NS	50	0.000 01
		红层泥质砂岩	HNS	45	0.002 34
		砂岩	SY	90	0.000 01
		红层砂岩	HSY	85	0.003 8
		石英砂岩	SYS	10	0.000 01
		页岩	YY	70	0.000 01
		红层页岩	HYY	50	0.000 01
		红层粘土岩	HLT	40	0.000 01
		硅质岩	GZ	80	0.003 92
		泥质灰岩	NHY	80	0.000 01
		白云岩	BY	100	0.000 01
		石灰岩	HY	100	0.000 01
		石英闪长岩	YSY	100	0.012 19
		花岗岩	HG	100	0.044 98
		干抗压	GKY	223	0.035 1
		湿抗压	SKY	198	0.037 27
		软化系数	RH	89	0.028 41
断裂影响	DL	大断裂	DDL	85	0.013 26
		普通断裂	PDL	706	0.005 41
地貌	DM	坡度	PD	89.974 5	0.007 2
		DEM 曲率剖面曲线	POQ	5.04×10^6	0.001 83
		DEM 曲率平面曲线	PIQ	6.62×10^6	0.001 55
		坡向	PX	360	0.000 52
		降雨条件	YJY	244.198	-0.002 07

(6) 评价因子的综合计算分析

根据表 1 的计算结果,分人类工程活动、岩性、力学参数、断裂影响、地形地貌等因素,分别计算其影响程度。计算公式为:

$$RL_i = \sum (K_{ct} \times CT_i + K_{dl} \times DL_i + K_{ks} \times KS_i) \quad (2)$$

$$YX_i = \sum (K_{qm} \times QM_i + K_{py} \times PY_i + K_{hgl} \times HGL_i + K_{ly} \times LY_i + K_{hly} \times HLY_i + K_{ny} \times NY_i + \dots + K_{hy} \times HY_i + K_{ysy} \times YSY_i + K_{hg} \times HG_i) \quad (3)$$

$$YL_i = \sum (K_{gky} \times GKY_i + K_{sky} \times SKY_i + K_{rh} \times RH_i) \quad (4)$$

$$DL_i = \sum (K_{ddl} \times DDL_i + K_{pdl} \times PDL_i) \quad (5)$$

$$DM_i = \sum (K_{pd} \times PD_i + K_{poq} \times POQ_i + K_{piq} \times PIQ_i) \quad (6)$$

$$JY_i = K_{jy} \times YJY_i \quad (7)$$

式中: K 为表1当中的相关系数, RL_i 、 CT_i 、 DL_i 、 KS_i 分别为栅格 i 人类工程活动强度、村屯密度、道路密度、矿山密度,其余的计算因子见表1。

按照表1中的数据,通过公式(2)~(7),在ArcGis软件平台,利用栅格加权叠加工具,分别计算出人类工程活动因素、岩性因素、岩石力学因素、断裂影响因素、地貌因素栅格图。

(7) 地质灾害易发程度分析计算

地质灾害的发生主要受自然因素及人为因素影响。根据以上计算的人类工程活动强度因素、岩性因素、岩石力学因素、断裂影响因素、地貌因素,以此计算崩塌(危岩)、滑坡泥石流地质灾害的易发程度大小^[2]。

计算公式为:

$$R_i = \sum (RL_i/V_{rlmax} \times 2.5 + YX_i/V_{yxmax} \times 1.5 + YL_i/V_{ylmax} \times 1.5 + DL_i/V_{dlmax} \times 0.5 + DM_i/V_{dmax} \times 0.5) \quad (8)$$

式中: R_i ——栅格 i 地质灾害易发程度值;

RL_i ——栅格 i 人类工程活动对地质灾害影响值;

V_{rlmax} ——类工程活动对地质灾害影响栅格图最大值;

YX_i ——栅格 i 岩性因素对地质灾害影响值;

V_{yxmax} ——岩性因素对地质灾害影响栅格图最大值;

YL_i ——栅格 i 岩石力学因素对地质灾害影响值;

V_{ylmax} ——岩石力学因素对地质灾害影响栅格图最大值;

DL_i ——栅格 i 断裂因素对地质灾害影响值;

V_{dlmax} ——断裂因素对地质灾害影响栅格图最大值;

DM_i ——栅格 i 地貌因素对地质灾害影响值;

V_{dmax} ——地貌因素对地质灾害影响栅格图最大值。

经前述计算结果:人类工程活动因素、岩性因素、岩石力学因素、断裂影响因素、地貌因素栅格图,按照公式(8)计算,在ArcGis软件平台,利用栅格加权叠加

工具,计算出经济区崩塌、滑坡、泥石流地质灾害易发程度图。

经济区易发程度分3个等级,计算值1~3,为地质灾害低易发区,面积23 321.09 km²,占经济区陆地总面积(不含岛屿,下同)的55.75%,主要分布在北海市区、合浦县、钦州市钦南区、防城港市上思县、东兴市、南宁市江南区、武鸣县、宾阳县、横县、隆安县等地势平缓、人类工程活动相对较弱的碎屑岩、红层碎屑岩、碳酸盐岩区;计算值4~6,为地质灾害中易发区,面积16 192.18 km²,占经济区陆地总面积的38.71%,主要分布在防城港市防城区板八乡-钦州市钦北区大寺镇-浦北县平睦镇,北东向展布的深大断裂影响带当中的碎屑岩、红层碎屑岩、花岗岩区,南宁市青秀区-邕宁区南阳镇等人类工程活动强烈的红层碎屑岩区;计算值7~10,为地质灾害高易发区,面积2 319.97 km²,占经济区陆地总面积的5.54%,主要分布在防城港市防城区峒中镇-钦州市钦北区大峒镇-灵山县寨圩镇,北东向展布的深大断裂影响带当中的花岗岩、碎屑岩高陡边坡区,南宁市宾阳县昆仑山周边花岗岩高陡边坡区域,其中钦州市浦北县城也处于地质灾害高易发区当中(图2)。

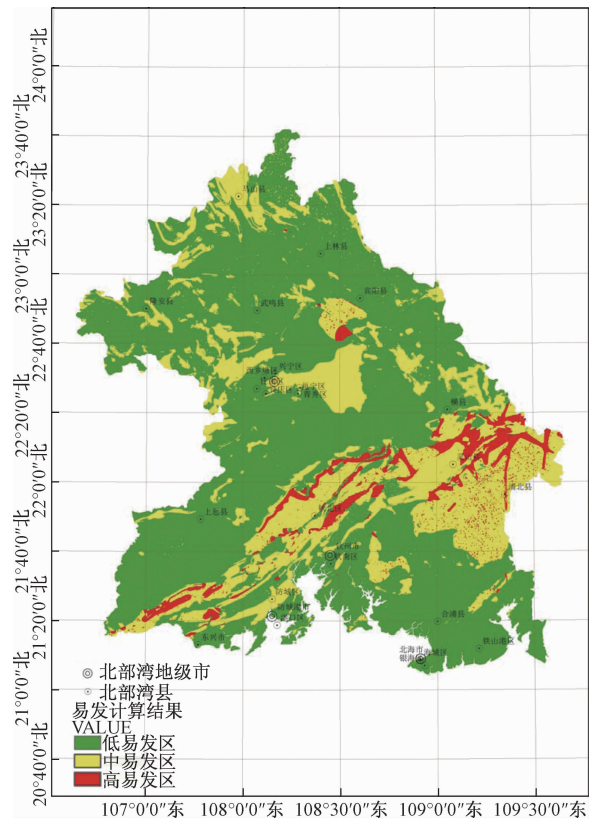


图2 经济区(崩、滑、流)地质灾害易发程度图

Fig. 2 The occurrence level of geological hazards district (collapse, slide, flow) in Economic Zone

3 经济区台风暴雨与地质灾害关系及有效雨量

(1)经济区台风暴雨与地质灾害关系的分析

北部湾的台风暴雨主要来源于西太平洋台风、南海和北部湾区域内生成的热带风暴。从地质灾害发生数量分析,2007 年、2008 年、2009 年、2010 年、2013 年、2014

年为较少的年份(2015 年无台风影响),台风期间地质灾害占比分别为 13.64%、43.04%、17.95%、22.22%、9.72%、25.58%;2006 年、2011 年地质灾害数量较多,同时是台风(热带风暴)诱发地质灾害的高发年,台风(热带风暴)期间地质灾害占比分别达到 97.64%、78.57%(图 3)。北部湾经济区地质灾害发生数量受台风(热带风暴)带来的暴雨影响显著^[3]。

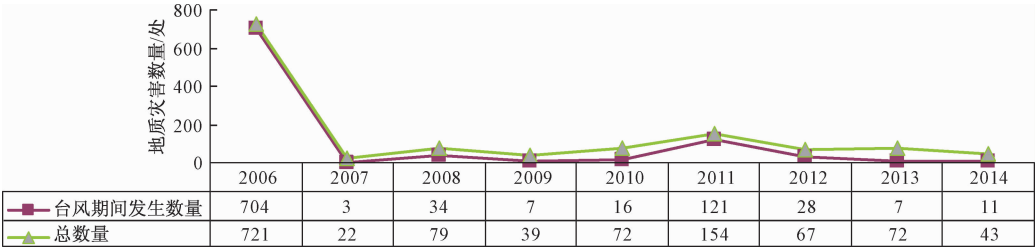


图 3 北部湾经济区 2006 年至 2014 年地质灾害数量与台风关系图

Fig.3 The relationship of the number of geological hazards and typhoon from 2006 to 2014 in Beibu Gulf Economic Zone

(2)诱发地灾灾害的有效降雨量

一次降雨事件发生后,降雨量并不能完全作用斜坡体,同时地质灾害发生的也受累积降雨量的影响,而不仅仅是当日降雨量,降雨诱发的地质灾害是通过雨水下渗到坡体内部,对坡体产生作用而发生的,即有效雨量^[4]。

通过对地质灾害专业监测点数据分析,北部湾经济区诱发地质灾害的有效雨量,最多累积前 5 天的降雨量。

其关系曲线为:

$$Y = K_0 \times Y_0 + K_1 \times Y_1 + K_2 \times Y_2 + K_3 \times Y_3 + K_4 \times Y_4 \tag{9}$$

式中:Y——有效雨量;

Y_0 ——当天降雨;

K_0 ——当天降雨的有效系数,在北部湾经济区,根据监测数据与当天降雨量的相关分析,为 0.534;

Y_1 ——前 1 天降雨;

K_1 ——前 1 天降雨的有效系数,在北部湾经济区,根据监测数据与当天降雨量的相关分析,为 0.403 6;

Y_2 ——前 2 天降雨;

K_2 ——前 2 天降雨的有效系数,在北部湾经济区,根据监测数据与当天降雨量的相关分析,为 0.22;

Y_3 ——前 3 天降雨;

K_3 ——前 3 天降雨的有效系数,在北部湾经济区,根据监测数据与当天降雨量的相关分析,为 0.20;

Y_4 ——前 4 天降雨;

K_4 ——前 4 天降雨的有效系数,在北部湾经济区,根据监测数据与当天降雨量的相关分析,为 0.196。

(3)诱发地灾灾害的临界有效雨量

根据 2006 年至 2015 年广西突发性地质灾害与降雨强度的之间的关系统计。北部湾经济区诱发地质灾害的临界有效雨量为当地历年月均降雨量的 30%。

4 地质灾害风险评价

(1)风险评价模型建立

根据前述的数据整理分析,构建北部湾特殊气象条件下(台风、暴雨)地质灾害风险评价模型^[5]。

$$R_i = (Y_{iv} \text{ 有效} / Y_{ic}) \times S_i \times (V_i / V_{vmax}) \tag{10}$$

式中; R_i ——为栅格 i 灾害风险程度指数,越高代表其风险程度越高;

Y_{iv} ——为栅格 i 有效降雨量;

Y_{ic} ——为栅格 i 临界有效降雨量,北部湾经济区临界雨量为栅格 i 历年月均降雨量 $\times 0.3$ 。

S_i ——为栅格 i 地质灾害易发程度值;

V_i ——为栅格 i 人口财产等量值;

V_{vmax} ——为人口财产等量值栅格图最大值。

(2)模型验证

为验证北部湾特殊气象条件下(台风、暴雨)地质

灾害风险评价模型,选择 2011 年 9 月 30 日至 10 月 8 日期间,201117 纳沙台风带来的暴雨期间,验证北部湾经济区 2011 年 10 月 1 日地质灾害发生的风险(这一天发生的地质灾害数量较多)。

根据广西气象局气象台站的监测数据,分布绘制 2011 年 9 月 26 日至 10 月 1 日的日降雨量等值线图。按照公式(9)计算 2011 年 10 月 1 日的有效雨量(图 4)。根据公式(10)计算经济区 2011 年 10 月 1 日地质灾害风险(图 5)。

(3) 评价结果分析

通过提取各个地质灾害点的信息。发现所发生的地质灾害点风险值均超过 3,大部分超过 4。风险值较低的点,其降雨量较小。分析其原因,是降雨监测点没有覆盖到这些点的周围,以至降雨插值数据出现偏差,影响了计算结果。

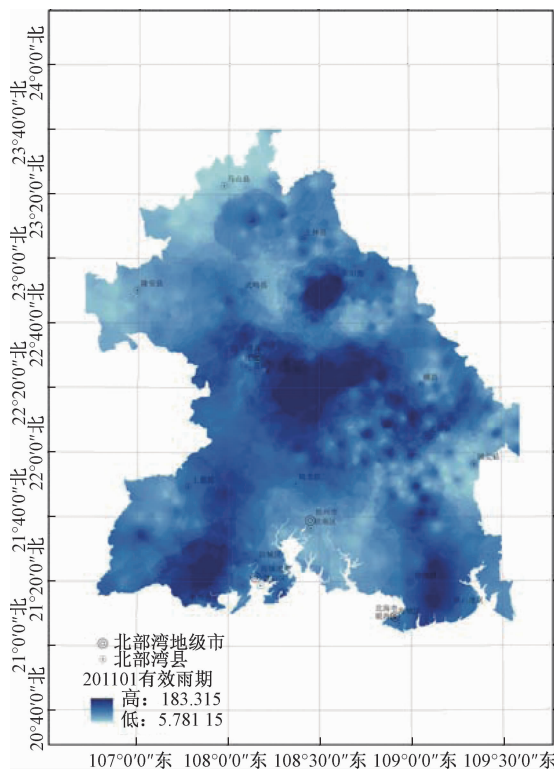


图 4 2011. 10. 1 北部湾经济区有效降雨分布图

Fig. 4 Effective rainfall division in Beibu Gulf Economic Zone in 2011. 10. 1

5 结论

基于 ARCGIS10.0 软件平台,解析了北部湾经济区基础地质环境背景,包括地层的岩性分类构成、力学参数、构造,降雨(历年月均降雨、重点时段每天降雨)、人类工程活动(分辨率 8 m 绿色光谱卫片解译)、

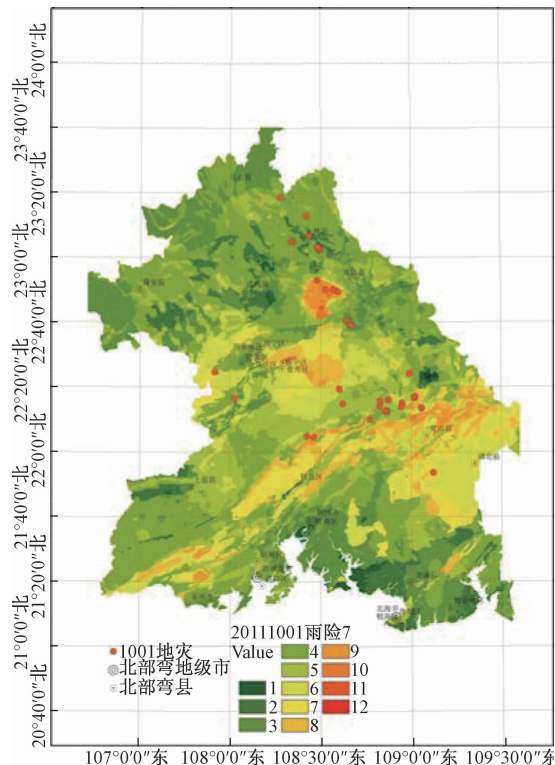


图 5 2011. 10. 1 北部湾经济区地质灾害风险分布图

Fig. 5 The risk of geological hazards division in Beibu Gulf Economic Zone in 2011. 10. 1

地形地貌(1:5 万尺度 DEM)。解析尺度为 15 m × 15 m。

通过历年地质灾害调查数据与岩性分类构成、力学参数、构造、人类工程活动的矩阵相关分析,得到了其相关系数,以此计算绘制了北部湾经济区的地质灾害易发区划图。

解析台风、强降雨期间突发性地质灾害的时空分布、岩性构成、力学参数、实时降雨等参数,提取广西地质灾害专业监测网络相关监测数据。通过 SPSSV21 软件平台进行数据分析。求取了有效降雨量、诱发地质灾害的临界有效雨量。进一步构建北部湾经济区强降雨条件下地质灾害风险评价模型,并进行了验证。

该模型可以在北部湾经济区地质灾害预警预报工作中提供一定的基础及应用。同时可以为经济区工程建设提供部分参考。

存在的问题:

(1) 区域历史降雨数据每个县区只有一个站点,基于这些数据构建的区域降雨资料,不能完全反映北部湾经济区降雨的实际情况。应进一步收集整理各气象站点每小时尺度的降雨资料,构建更接近经济区实

际降雨分布的基础数据。

(2) 广西地质灾害专业监测网络正在建设完善当中,其数据量还有累积的空间。需要进一步加强这方面的工作。

参考文献:

- [1] 刘传正. 论地质灾害防治的科学理念[J]. 水文地质工程地质, 2013, (40)6:1-6.
LIU Chuazheng. Scientific concept of geological disaster prevention and control[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2013, (40)6:1-6.
 - [2] 吴彩燕, 乔建平, 等. 基于 GIS 与信息量模型的地层因素对三峡库区滑坡发育的影响关系 [J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(6):140-141.
WU Caiyan, QIAO Jianping, et al. Influence relation of landslide development in Three Gorges Reservoir region exerted by formation factors based on GIS and information value model [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(6):140-141.
 - [3] 何小娟, 丁治英. 广西北部湾地区台风暴雨的统计特征[J]. 气象研究与应用, 2007, 28(2):31-35.
HE Xiaojuan, DING Zhiying. Statistical characteristics of typhoon and rainstorm in Guangxi Beibu Gulf economic zone [J]. Meteorological Research and Application, 2007, 28(2):31-35.
 - [4] 薛凯喜. 极端降雨诱发山地公路地质灾害风险评价及应用研究[D]. 重庆大学, 2011:35-37.
XUE Kaixi. Risk assessment and application research on geological disaster in highway of mountain caused by extreme rainfall. [D]. Chongqing University, 2011:35-37.
 - [5] 马寅生, 张业成, 等. 地质灾害风险评价的理论与方法 [J]. 地质力学学报, 2004, 10(1):7-18.
MA Yinsheng, ZHANG Yecheng, et al. Theory and method of risk assessment on geological disaster. [J]. Journal of Geomechanics. 2004, 10(1):7-18.
-
- (上接第 120 页)
- ZHANG Pengxiang, LI Shaoquan. Tectonic and fractal characteristics of coal and gas outburst in LinHua Mine [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2013, 9(10):94-97.
 - [9] 魏大勇, 王飞, 许进鹏, 等. 基于分形与模糊综合评价法的矿井突水危险性评价[J]. 煤矿安全, 2013, 44(8):184-186.
WEI Dayong, WANG Fei, XU Jinpeng, et al. Risk evaluation of mine water inrush based on the fractal and fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(8):184-186.
 - [10] 王静宇, 李翠平, 李仲学. 基于主成分聚类分析的煤层底板突水危险性预测[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(8):120-125.
WANG Jingyu, LI Cuiping, LI Zhongxue. Risk prediction of water inrush from coal floor based on principal component clustering analysis [J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(8):120-125.
 - [11] 黄彪, 冯有利. “双端封堵侧漏技术”在探测大采深工作面煤层底板裂隙中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(3):79-88.
HUANG Biao, FENG Youli. The monitor of fractures in the depth stratum used by Double-block leak technology under the coal seam [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(3):79-88.
 - [12] 吴基文, 翟晓荣, 沈书豪, 等. 淮北桃园煤矿北八采区太原组灰岩含水层放水试验与监测成果分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(4):75-81.
WU Jiwen, ZHAI Xiaorong, SHEN Shuhao, et al. Analysis of draining test and monitoring result of limestone of Taiyuan formation of the eighth mining area in the north of Taoyuan coal mine in Huaibei [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(4):75-81.
 - [13] Wu Q, Xing L T, Ye C H, et al. The influences of coal mining on the large karst springs in North China [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 64(6):1513-1523.