

· 环境地质 ·

基于承灾体易损性的县域单元地质灾害风险评估

李春燕, 孟晖*, 张若琳, 温铭生

LI Chunyan, MENG Hui*, ZHANG Ruolin, WEN Mingsheng

中国地质环境监测院, 北京 100081

China Geological Environmental Monitoring Institute, Beijing 100081, China

摘要: 县域单元的地质灾害风险评估是宏观层面资源环境承载能力监测预警的重要组成部分, 可以作为行政单元生态文明建设考核的依据, 对国土空间规划编制也具有重要的参考价值。针对承灾体易损性定量评价这一难点, 尝试改进笔者以前的评估方法, 以地质灾害易发区内的人口和资产作为承灾体统计, 并根据省级单元地质灾害调查数据进行校正; 以原国土资源部权威灾情数据与承灾体的比值作为易损性, 依据全国样本值进行了承灾体易损性分级标准划定, 结合地质灾害危险性区划完成全国 2869 个县域单元的地质灾害风险评估。结果表明, 全国共有 162 个地质灾害高风险单元, 701 个中风险单元和 2006 个低风险单元。地质灾害高风险区集中分布于横断山区、乌蒙山区、秦岭—大巴山区、长白山区等地。

关键词: 县域单元; 地质灾害; 易损性; 风险评估

中图分类号: P694 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2021)09-1547-13

Li C Y, Meng H, Zhang R L, Wen M S. Geological hazard risk assessment based on vulnerability of disaster-bearing body at county unite scale. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(9): 1547-1559

Abstract: The assessment of geological hazard risk at county unit is an important part of the monitoring and early warning of the carrying capacity of resources and environment at the macro scale. Such assessment could be as the basis for ecological civilization construction of administrative, and also benefit for the compilation of territorial space planning. In order to overcome the difficulty in quantitative evaluation of vulnerability of the hazard-bearing body, this paper attempts to improve the evaluation method in the author's previous paper. The population and GDP assets in the geological disaster prone area are taken as the statistics of the disaster bearing body of the threatened object, and the correction is made according to the geological disaster survey data of provincial units. Taking the ratio of the authoritative disaster data of the former Ministry of Land and Resources and the disaster bearing body of the threatened object as vulnerability, the vulnerability classification standard of the disaster bearing body of the threatened object was delimited according to the national sample value, and the geological disaster risk assessment was completed for 2869 county units in China combined with the geological disaster risk zoning. The results showed that there were 162 geological hazard high-risk units, 701 medium-risk units and 2006 low-risk units in China. The high risk areas of geological disasters are concentrated in Hengduan Mountain area, Wumeng Mountain area, Qinling-Daba Mountain area and Changbai Mountain area.

Key words: county unit; geo-hazard; vulnerability; risk assessment

中国地质灾害发育频繁, 尤以突发性地质灾害造成的人员伤亡和经济损失严重^[1]。根据自然资源

部全国地质灾害通报统计数据, 2010—2019 年间除 2018 年灾情较轻外, 每年突发性地质灾害发灾 6000

收稿日期: 2019-09-08; 修订日期: 2020-04-05

资助项目: 中国地质调查局项目《地质环境承载能力评价与监测示范研究》(编号: 12120115050701)、国家重点研发计划课题《地下水源智能可靠勘测关键技术及装备研发》(编号: 2020YFC1512401)

作者简介: 李春燕(1987-), 男, 硕士, 工程师, 从事水文地质水资源调查和地质环境综合研究工作。E-mail: lichunyan@mail.cgs.gov.cn

* 通信作者: 孟晖(1962-), 女, 教授级高工, 从事环境地质研究。E-mail: menghui@mail.cgs.gov.cn

起以上,因灾死亡/失踪人数在200~700人,直接经济损失在20~100亿元不等。开展地质灾害风险评估具有广泛的现实意义,微观场地尺度的风险评估为建设工程用地适宜性及基础设施布局提供依据,为单体隐患点针对性治理、制定应急措施提供基础^[2];县级行政区在以国土空间规划为主的各类管控中作为承上启下的重要环节^[3],宏观县域单元尺度的地质灾害风险评估更偏重于支撑防灾减灾的行政管理^[4],是国家层面资源环境承载能力监测预警的重要内容之一^[5],可以作为行政单元生态文明建设考核的依据,对国土空间规划编制也具有重要的参考价值^[6-7]。

对地质灾害风险评估的关注与研究兴起于近几十年。1982—2005年,联合国召开数次会议明确防灾减灾的必要性与总体思路,研讨地质灾害风险评估技术方法,使该领域逐步成为热点。瑞士、法国、美国、意大利等国相继开展了自然单元尺度的地质灾害风险评估^[8-12]。在国内,张梁等^[13]构建了地质灾害风险评估指标体系与模型;刘传正^[14]提出了地质灾害发生风险的辨识方法;向喜琼等^[15]提出了地质灾害风险评估的流程^[15];殷坤龙等^[16]分析地质灾害监测预警的需求,探索了地质灾害风险预警的方法;吴树仁等^[17-18]重点阐述了不同工作程度地区地质灾害风险定性分析-定量评价相结合的评估方法,并根据张梁等^[19]的全国人口地质灾害伤亡率分级研究成果,结合1995—2005年全国地质灾害灾情数据,定量提出中国地质灾害人口伤亡率划分阈值。2005年前后,对地质灾害的社会属性的关注逐渐突显,在风险评估的同时开始重视风险管理^[1, 4, 19-20]。

1984年,在联合国教科文组织的一项研究计划中,Varnes提出了地质灾害风险的定义:在一定区域和时间限度内,特定的地质灾害现象对生命、财产、经济活动等可能造成的损失。这一概念得到了国际地质灾害研究领域的普遍认同^[2, 21-22]。根据定义,地质灾害风险可以表示为:

$$R=f(H,E,V) \quad (1)$$

其中, R (risk)为地质灾害风险; H (hazard)为地质灾害危险性,是指灾害发生的时空概率; E (element)为特定区域内受特定地质灾害威胁的对象,包括人口、财产、基础设施、经济活动等,简称为承灾体; V (vulnerability)为地质灾害以一定强度发

生而对承灾体可能造成的损失程度,即承灾体的易损性。由此可见,危险性与承灾体的易损性是决定地质灾害风险的关键^[2, 13, 17-18, 22-24]。

地质灾害的危险性评价相对成熟,承灾体易损性=(灾害对承灾体可能造成的损失)/(承灾体数量)也已经逐渐成为共识^[5, 17, 23, 25],而难点在于承灾体的界定及其易损性定量评价方法^[5, 26]。前人根据灾情统计的内容,在研究中将 E (element)定义为人口,以及财产或经济,并基于以历史数据分析指导未来预测的思想^[17, 23],以历史年均因灾死亡人口数量和年均因灾财产或经济损失表征“灾害对承灾体可能造成的损失”。笔者根据前人研究成果,在前期依托2001—2015年原国土资源部地质灾害报告制度所取得的长时间序列灾情数据,以历史年均因灾死亡人口和直接经济损失与县域年均人口和GDP的比值作为承灾体的易损性,保障了评价数据的权威、连续和可获取,并据此完成了全国县域单元地质灾害风险评估^[25]。

事实上,很多县级行政单元都处于山区与平原交汇的地貌过渡带,受地质灾害威胁的对象主要分布在山地丘陵区,平原区不会受到地质灾害的威胁和影响。笔者认为前人在研究中之所以将地质灾害威胁的对象定义为县域内全部的人口和GDP,是由于当时尚未开展全国性的地质灾害调查,不存在权威、全面的地质灾害隐患点分布及其威胁的人口和GDP系列数据。在这样的背景下,不失为一种切实可行的方法。

1999年起,中国开展并完成了2020个山区丘陵县的1:10万地质灾害调查工作,取得了详实的地质灾害隐患点空间分布及威胁人口和GDP系列数据。但由于管理机制的限制,数据尚未面向社会公众开放。可获取的数据是以省为单元的受威胁人口与GDP数据^[27]。因此,需要探索一种快速、便捷的方法评估县域单元受威胁人口数量和GDP数值。

目前在全国、省、市县3个层面,均依托地质灾害调查工作完成了地质灾害易发程度区划。笔者据此提取县域地质灾害易发区内的人口数量和GDP数值,以省域实际调查获取的受威胁人口与GDP数据和地质灾害易发区内的人口与GDP统计数据作比较,确定校正系数,对县域单元易发区的人口和GDP数据加以校正,作为“受威胁对象”。

以历史因灾死亡人口数量和造成的直接经济损失作为“灾害可能造成的损失”。以此计算受威胁对象的易损性,从而完善全国县域单元地质灾害风险评估,进行结果验证并与笔者前期的评估结果进行对比。

1 数据来源与算法

1.1 数据来源

全国地质灾害易发程度区划与地质灾害危险性区划数据来源于全国地质灾害调查数据库;地质灾害点灾情数据来源于原国土资源部 2001—2015 年地质灾害速报制度和月报制度报送的数据;2014 年人口和 GDP 空间分布栅格数据(1000 m×1000 m)来源于中国科学院资源环境科学数据中心;县级行政区划(含所属省、市名称)空间数据来源于国家地理信息中心(2013 年)。

1.2 算法

包括地质灾害危险性评价、承灾体数量空间分析统计和承灾体易损性评价。其中后两者是针对前期工作^[25]的完善之处。

1.2.1 地质灾害危险性评价

地质灾害危险性的评价方法较多,常见的方法有模糊综合评价法、多元回归分析法、证据权法、人工神经网络法、层次分析法、灰色关联分析法等^[15, 26-29, 31-32]。这些方法基础理论不同、对数据的需求不同,各有优点和劣势。根据基础数据类型,以及对以上方法的理解程度,本次选取证据权法。

证据权法早期主要用于预期矿产资源储量。近年被引入地质灾害危险性评价中,具有易于理解、操作简便、受主观因素影响小等特点。通过将滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷灾害点与地形坡度、暴雨次数等评价指标空间叠加,进行相关性分析,求得每个指标与滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷的相关程度,依据相关程度赋予各指标不同的权重,进行叠加计算,分别得到崩塌、滑坡、泥石流危险性指数图和地面塌陷危险性指数图,根据危险性指数由高到低将危险性划分为高、中、低、极低 4 个等级。将 4 张危险性评价分级图按照“就高原则”叠加,形成自然单元地质灾害危险性评价结果。

采用最大面积法将自然单元评价结果转化为县域单元,即以县域面积内面积最大的评价等级作

为该县域的危险性评价等级。再结合资料,根据专家经验对评价结果进行校验修订,最终确定县域地质灾害危险性等级^[5, 25]。

1.2.2 受威胁对象计算

全国地质灾害易发程度区划分为高、较高、中等、较低、低 5 个等级。提取其中的高易发、较高易发、中等易发(以下简称“易发区”)3 个等级区域,与全国县级区划矢量图层进行空间叠加分析,使每一块易发区图斑具有县级和省级行政区名称属性。空间叠加人口与 GDP 分布数据,分析各易发区图斑内的人口数量和 GDP 数值,依据各易发区图斑的行政区名称属性,统计各县域、省域地质灾害易发区内人口数量和 GDP 数值。

以 2015 年度每个省实际调查数据与空间统计数据的商,作为该省内各县的空间统计数据校正系数,以校正后的数据作为各县地质灾害承灾体。具体见以下公式:

$$E_{N_n} = \frac{D_N}{T_N} \times e_{N_n} \quad (2)$$

其中, E_{N_n} 为校正后的 N 省内 n 县的地质灾害承灾体数量; D_N 为实际调查获取的 N 省地质灾害承灾体数量; T_N 为 ArcGIS 空间统计分析获取的 N 省地质灾害承灾体数量, $\frac{D_N}{T_N}$ 为每个省域内各县域的校正系数; e_{N_n} 为 ArcGIS 空间统计分析获取的 N 省内 n 县的地质灾害承灾体数量。

1.2.3 承灾体易损性计算

地质灾害对承灾体造成的损害主要有直接与间接经济损失、人员伤亡、资源环境破坏等。由于人口、财产和环境的性质不同,且考虑到灾情统计数据的内容,将承灾体的易损性分为人口安全易损性与资产易损性两部分。

(1) 人口安全易损性评价

人口安全易损性是指因灾造成人口死亡的最大可能程度。以县域为单元进行评价,可采用县年均因灾最大可能死亡人口占县受威胁人口数量的比,即“因灾死亡人口比”来表达。该比值与人口安全易损程度呈正相关。

由于县年均因灾最大可能死亡人口数难以预测,本文采用以往地质灾害实际造成的县年均死亡人口表征。基于 GIS 空间分析统计功能,以县为单元统计 2001—2015 年县域内所有灾害点的死亡人

口总数,计算年均值。

$$\text{因灾死亡人口比} = \frac{\text{县年均地质灾害死亡人口(人/a)}}{\text{县受威胁人口数量(万人)}} \quad (3)$$

通过以全国县域“因灾死亡人口比”数据为样本进行分级测算,结合前人的研究成果^[13, 17-18, 23, 30]^①,提出人口安全易损性评价分级标准(表1)。

(2) 资产易损性评价

资产易损性是指因灾造成直接经济损失的最大可能程度。采用县年均因灾最大可能直接经济损失占县受威胁 GDP 数值的比,即“因灾直接经济损失比”来表达,其比值与资产易损程度正相关。与人口安全易损性评价理念一致,采用以往地质灾害实际造成的县年均直接损失表征县年均因灾最大可能直接经济损失。

$$\text{因灾直接经济损失比} = \frac{\text{县年均地质灾害直接经济损失(万元/a)}}{\text{县受威胁 GDP 数值(百万元)}} \quad (4)$$

以全国县域“因灾直接经济损失比”数据为样本进行测算分级,结合前人的研究成果,提出资产易损性评价分级标准(表2)。

(3) 承灾体易损性评价

将县域地质灾害人口安全易损性评价分区结果与资产易损性评价分区结果,按照“就高原则”进行叠加,形成县域单元承灾体易损性定量评价分区结果。

1.2.4 地质灾害风险定性综合评估

按照地质灾害风险定性综合评估方法,根据地质灾害危险性(GHI)4个等级、承灾体易损性(EVI)4个等级的组合特征,将地质灾害风险(GRI)划分为高风险、中风险、低风险3个等级(表3)。组合后第*i*个评价单元的地质灾害风险性指数 R_i ,计算如公式(5),数值越大,表示风险性(危险性、易损性)越高。

$$R_i = \begin{cases} 1 & (GHI=1 \cup EVI=1) \cup (GHI=2 \cap EVI=2) \\ 2 & (GHI=2 \cap EVI \in [3,4]) \cup \\ & (GHI=3 \cap EVI \in [2,3]) \\ 3 & (GHI \in [3,4] \cap EVI=4) \cup \\ & (GHI=4 \cap EVI \in [3,4]) \cup (GHI=3 \cap EVI=4) \end{cases} \quad (5)$$

采用二维表格表示时具体见表3。

2 全国地质灾害风险评价

2.1 评价单元

本次评价的基本评价单元为县级行政单元,包

括市辖区、县、自治县、县级市。根据2013年行政区划,全国陆域共有2869个评价单元(不包括台湾省和南海诸岛)。

2.2 评价与结果分析

2.2.1 地质灾害危险性评价

依据评价结果(图1),全国共有地质灾害高风险单元453个、中危险单元1106个、低风险单元746个、极低危险单元564个。地质灾害危险性高的区域主要连片分布于云南、四川、重庆、贵州大部及藏东南、陕南、甘肃东部的山地丘陵区,辽东、太行山南麓等处有零星分布。这些地区地形起伏极大,构造发育强烈,因此评价结果与中国地质环境背景条件是相适应的。

2.2.2 受威胁对象易损性定量评价

地质灾害易发区(图2)面积共计 $314.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。根据灾情上报数据,2001—2015年共发生崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷灾害63481处,其中53972处位于易发区内,占比达85.02%。易发区共涉及全国30个省(市、区)的1983个县级行政单元。根据易发区与人口、GDP的空间统计分析,结合实际威胁对象数据,形成数据对照表(表4)。

2001—2015年,全国共有798个评价单元因灾造成人口死亡,总数8100人。人口安全高易损单元36个、中易损单元261个、低易损单元350个、极低易损性单元2222个(图3;表5)。人口安全高易损单元零星分布于天山、祁连山、横断山、黄土高原、武夷山、南岭等地区。人口安全易损性数值最高的县为广东省佛冈县,其因灾死亡人口4人,数量较低,但受威胁人口仅为2人,因此人口安全易损性数值达到了1356.86,也是所有评价单元中仅有的易损

表1 人口安全易损性评价分级

Table 1 Classification of population safety vulnerability assessment

易损性等级	高易损性	中易损性	低易损性	极低易损性
因灾死亡人口比(人/万人)	>4	4~0.5	0.5~0.1	<0.1

表2 资产易损性评价分级

Table 2 Classification of property vulnerability assessment

易损性等级	高易损性	中易损性	低易损性	极低易损性
因灾经济损失比(万元/百万元)	>20.0	2.0~20.0	0.5~2.0	<0.5

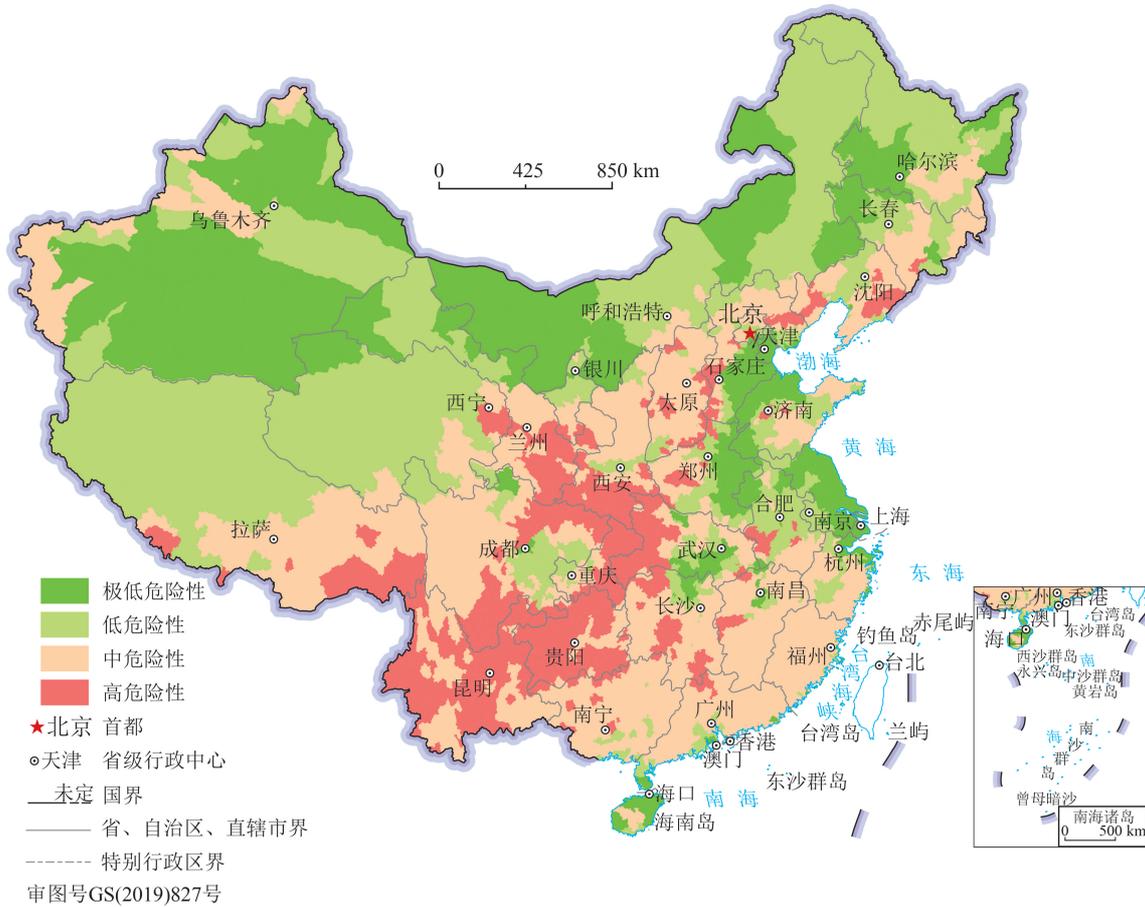


图 1 地质灾害危险性评价分区

Fig. 1 Zoning map of geological hazard assessment

性数值超过 1000 的县,排在第 2 位的北京市顺义区易损性数值为 356.078;甘肃省舟曲县因灾死亡人口最多,为 1451 人,是由于 2010 年特大型泥石流灾害的缘故,但受威胁人口数量超过 1.5 万人,所以人口安全易损性数值为 61.2547,排在全国第 7 位;新疆伊犁霍城县因灾死亡人口 2 人,受威胁人口仅 22

人,易损性数值为 59.5512,同样为高易损等级。事实上,36 个高易损单元中,17 个县(市)因灾死亡人口不足 10 人,但由于受威胁人口数量少,导致易损性数值相对高。

表 3 地质灾害风险定性综合评估

Table 3 Comprehensive assessment of geo-hazards risk

地质灾害风险	承灾体易损性			
	高易损性	中易损性	低易损性	极低易损性
高危险性	高	高	中	低
中危险性	高	中	中	低
低危险性	中	中	低	低
极低危险性	低	低	低	低

全国共有资产高易损单元 41 个、中易损单元 203 个、极低易损单元 257 个、极低易损单元 2368 个(图 4;表 6)。高易损单元分布较零散,没有规律。数据特征与人口安全易损性相似,如资产易损性数值最高的县(市)是新疆阿克苏市,因灾直接经济损失仅 96 万元,但单元内受威胁经济基数低,故资产易损性数值达到 19140.5。因灾直接经济损失最高的县(市)为辽宁省新宾满族自治县的 1 002 377 万元,资产易损性排在全国第 9 位。

将人口安全易损性和资产易损性按照“就高原则”对受威胁对象易损性进行综合评价,形成高易损单元 73 个、中易损单元 382 个、低易损单元 424

表4 各省受威胁对象统计值与实际值对照

Table 4 Comparison of statistical and actual values of threatened objects of provinces

序号	省(市、区)	统计威胁人口 /万人	统计威胁经济 /万元	2015年实际威胁人口 /万人	威胁人口 校正系数	2015年实际威胁经济 /万元	威胁经济 校正系数
1	安徽省	640.53	18 680 472	8.81	0.013754	276 830	0.014819
2	北京市	251.61	34 834 499	5.79	0.023011	—	—
3	福建省	1499.08	69 280 227	200	0.133416	526 487	0.007599
4	甘肃省	2043.90	41 287 699	226.26	0.110700	6 625 000	0.160459
5	广东省	1792.53	46 516 577	35.34	0.019715	1 221 298	0.026255
6	广西壮族自治区	2683.18	47 742 222	56.56	0.021079	859 733	0.018008
7	贵州省	4249.29	100 358 011	142.27	0.033481	2 765 060	0.027552
8	河北省	1356.04	49 322 452	15	0.011062	249 458	0.005058
9	河南省	1609.17	67 016 015	32	0.019886	678 613	0.010126
10	黑龙江省	133.36	3 978 463	21.13	0.158447	276 478	0.069494
11	湖北省	1876.10	56 758 233	89.41	0.047657	2 170 271	0.038237
12	湖南省	4822.11	142 799 444	168.19	0.034879	2 751 500	0.019268
13	吉林省	739.57	34 981 701	9.24	0.012494	218 507	0.006246
14	江苏省	53.22	4 429 311	3.7	0.069521	142 568	0.032187
15	江西省	2817.96	67 035 056	27.65	0.009812	476 200	0.007104
16	辽宁省	1715.86	78 565 577	23.4	0.013637	688 106	0.008758
17	内蒙古自治区	254.12	22 931 659	13.98	0.055014	683 071	0.029787
18	宁夏回族自治区	192.46	1 753 217	7.77	0.040373	74 193	0.042318
19	青海省	408.75	15 023 017	29.06	0.071095	1 392 328	0.092680
20	山东省	2120.90	138 562 988	7.93	0.003739	205 300	0.001482
21	山西省	1755.58	54 535 670	70.88	0.040374	1 028 834	0.018865
22	陕西省	1943.00	67 044 386	55.78	0.028708	512 149	0.007639
23	上海市	71479.00	73 720	—	—	—	—
24	四川省	3293.74	73 788 499	208.6	0.063332	8 732 003	0.118338
25	天津市	8.06	194 486	0.09	0.011166	15 721	0.080834
26	西藏自治区	123.21	2 773 436	27.78	0.225463	1 410 109	0.508434
27	新疆维吾尔自治区	13.42	305 075	7.12	0.530695	554 398	1.817252
28	云南省	3908.82	95 007 613	285.64	0.073076	5 356 779	0.056383
29	浙江省	1038.04	45 474 337	15.34	0.014778	446 417	0.009817
30	重庆市	2678.87	85 693 370	95.36	0.035597	3 926 624	0.045822

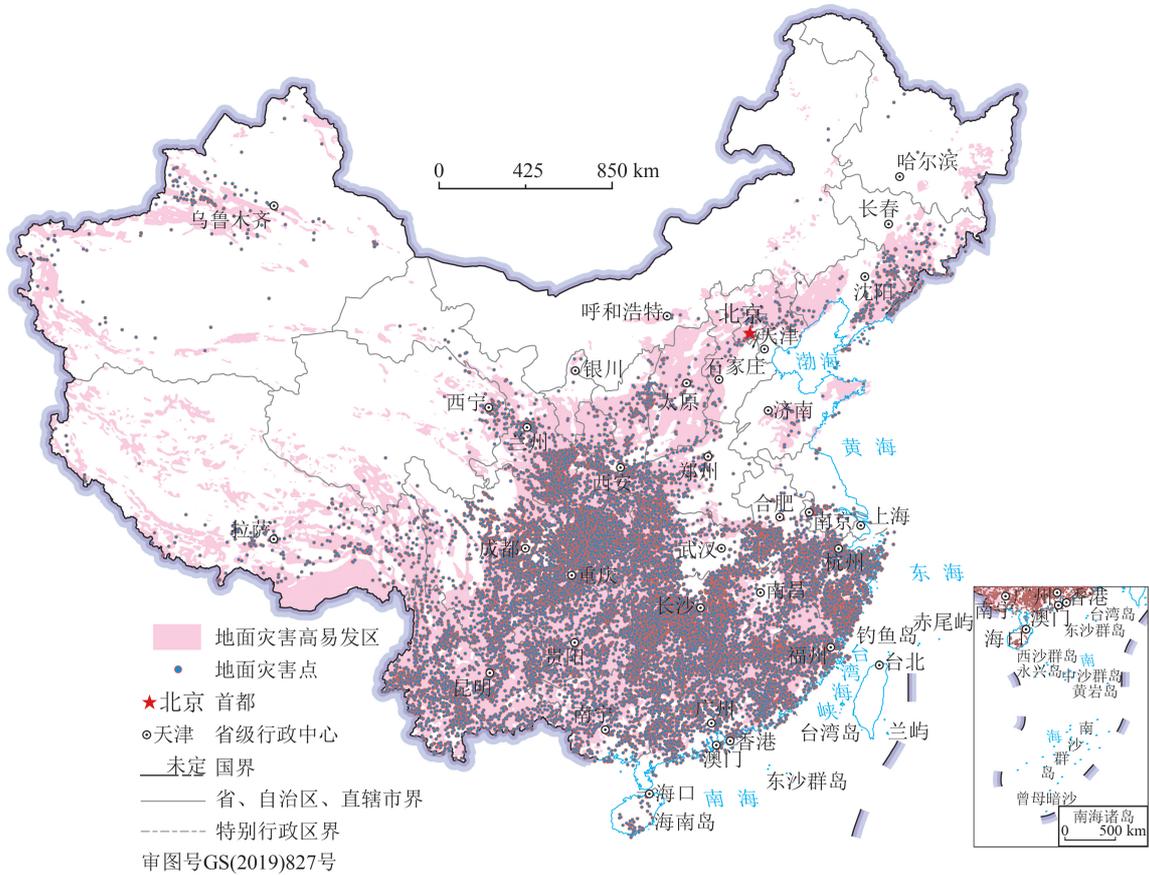


图 2 地质灾害易发区分布

Fig. 2 Distribution map of geological hazard-prone areas

个、极低易损单元 1990 个(图 5)。

受威胁对象高易损、中易损、低易损单元主要分布在西南和华南地区,即胡焕庸线的东南部。这片区域的人口和 GDP 密度相较于黄淮海平原和东南沿海低,但地质灾害易发程度高。区域内易损程度以中、低为主,也说明了对于灾害的防治效果整体良好。

2.2.3 地质灾害风险综合评估

按照地质灾害风险定性综合方法,将地质灾害危险性与受威胁对象的易损性集成分析,形成全国县域单元地质灾害风险评估结果(图 6)。全国共有 162 个地质灾害高风险单元、701 个中风险单元和 2006 个低风险单元,占比分别为 5.6%、24.4%、69.9%,其中有 10 个评价单元的危害危险性和易损性均为高。地质灾害高风险单元集中分布于横断山、乌蒙山、秦岭—大巴山、长白山区等地,受到龙门山断裂、鲜水河断裂、郟庐断裂的影响。150 个高

风险单元位于胡焕庸线东南侧,占比 92.6%,相关性极强。

对新疆、内蒙古、甘肃、河北、河南、山东、湖北、安徽、江苏、浙江、四川、贵州、福建等省(市、区)的地质环境领域专家和相关专业技术人员进行了评级结果咨询,保证了地质灾害风险性评估结果的可靠性。

与前期评价结果中高风险单元 216 个、中风险单元 643 个、2010 个低风险单元相比,整体分布规律一致,高风险单元数量有所减少^[25]。减少的单元主要位于四川盆地周边,即龙门山断裂一线与秦岭—大巴山区。分析高风险单元数量减少的原因,一是调整了受威胁对象的计算方法,降低了受威胁对象的基数,对比原计算方法,这一区带内评价单元的易损性减小了;二是调整了易损性评价的分级阈值,本次采用的分级阈值比前期采用的阈值高,也降低了易损性评价的等级。

表5 地质灾害人口安全易损性评价数据(高等级部分)

Table 5 Classification of population safety vulnerability assessment (high level part)

序号	省(市、区)	市(区、州)	县(市、区)	统计威胁人口/人	校正系数	校正威胁人口/人	因灾死亡人口总数	人口安全易损性	人口安全易损性等级
1	广东省	清远市	佛冈县	100	0.019715	2	4	1333.333333	高
2	北京市	市辖区	顺义区	163	0.023011	4	2	333.333333	高
3	广东省	佛山市	南海区	1 033	0.019715	20	9	300.000000	高
4	陕西省	西安市	灞桥区	2 761	0.028708	79	32	270.042194	高
5	宁夏回族自治区	吴忠市	青铜峡市	315	0.040373	13	2	102.564103	高
6	甘肃省	酒泉市	肃北蒙古族自治县	93	0.110700	10	1	66.666667	高
7	甘肃省	甘南藏族自治州	舟曲县	142 656	0.110700	15,792	1451	61.254644	高
8	新疆维吾尔自治区	伊犁哈萨克自治州	霍城县	42	0.530695	22	2	60.606061	高
9	云南省	怒江傈僳族自治州	贡山独龙族怒族自治县	40 000	0.073076	2,923	89	20.298780	高
10	广东省	肇庆市	四会市	7 616	0.019715	150	4	17.777778	高
11	浙江省	温州市	泰顺县	12 932	0.014778	191	5	17.452007	高
12	四川省	内江市	资中县	7 887	0.063332	499	13	17.368069	高
13	浙江省	丽水市	庆元县	100 411	0.014778	1,484	30	13.477089	高
14	四川省	甘孜藏族自治州	康定县	41 549	0.063332	2,631	53	13.429621	高
15	四川省	甘孜藏族自治州	丹巴县	56 351	0.063332	3,569	65	12.141590	高
16	安徽省	巢湖市	居巢区	8 197	0.013754	113	2	11.799410	高
17	新疆维吾尔自治区	伊犁哈萨克自治州	巩留县	2 013	0.530695	1,068	16	9.987516	高
18	江西省	九江市	庐山区	56 555	0.009812	555	8	9.609610	高
19	西藏自治区	拉萨市	墨竹工卡县	22 890	0.225463	5,161	66	8.525480	高
20	安徽省	巢湖市	无为县	25 452	0.013754	350	4	7.619048	高
21	广西壮族自治区	玉林市	容县	197 041	0.021079	4,154	41	6.580003	高
22	安徽省	六安市	金安区	26 205	0.013754	360	3	5.555556	高
23	广东省	清远市	清城区	18 378	0.019715	362	3	5.524862	高
24	甘肃省	张掖市	肃南裕固族自治县	14 197	0.110700	1,572	13	5.513147	高
25	江西省	吉安市	遂川县	577 331	0.009812	5,665	44	5.177994	高
26	浙江省	丽水市	莲都区	342 333	0.014778	5,059	38	5.007577	高
27	山西省	吕梁市	石楼县	43 461	0.040374	1,755	13	4.938272	高
28	陕西省	延安市	甘泉县	90 337	0.028708	2,593	19	4.884947	高
29	四川省	广安市	岳池县	8 844	0.063332	560	4	4.761905	高
30	广东省	湛江市	廉江市	14 491	0.019715	286	2	4.662005	高
31	广西壮族自治区	贺州市	昭平县	70 802	0.021079	1,492	10	4.468275	高
32	四川省	成都市	都江堰市	124 172	0.063332	7,864	51	4.323499	高
33	陕西省	榆林市	子洲县	299 296	0.028708	8,592	54	4.189944	高
34	广东省	云浮市	新兴县	56 841	0.019715	1,121	7	4.162950	高
35	辽宁省	本溪市	南芬区	224 982	0.013637	3,068	19	4.128640	高
36	四川省	眉山市	青神县	2 618	0.063332	166	1	4.016064	高

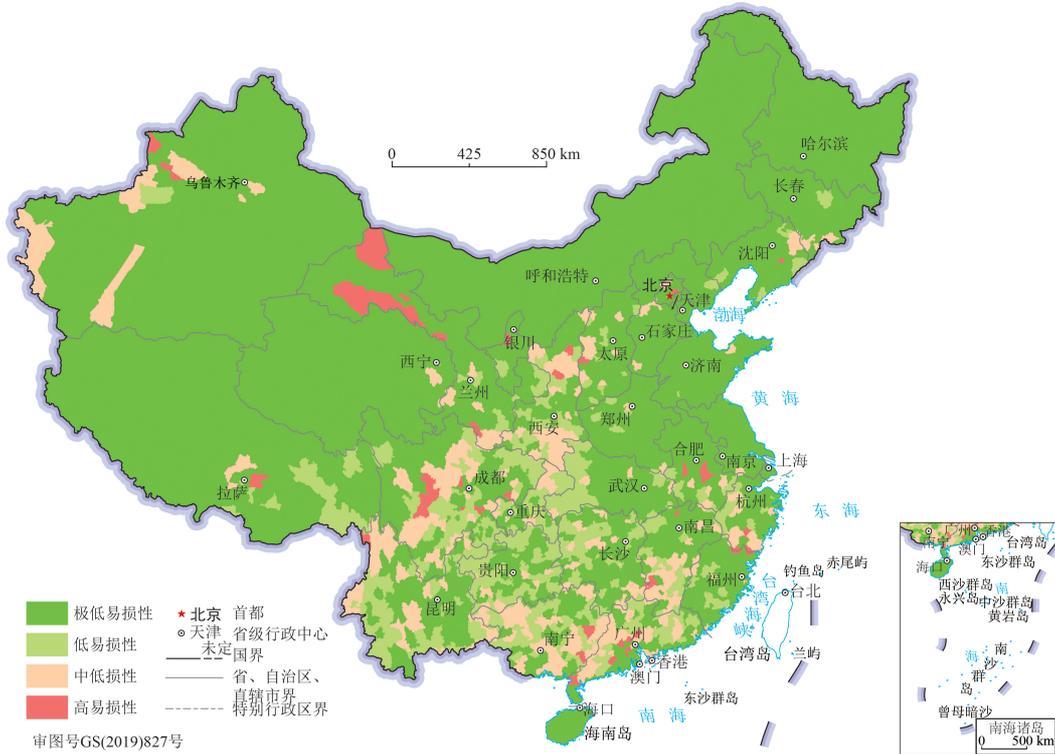


图 3 地质灾害人口安全易损性评价分区
Fig. 3 Zoning map of population safety vulnerability

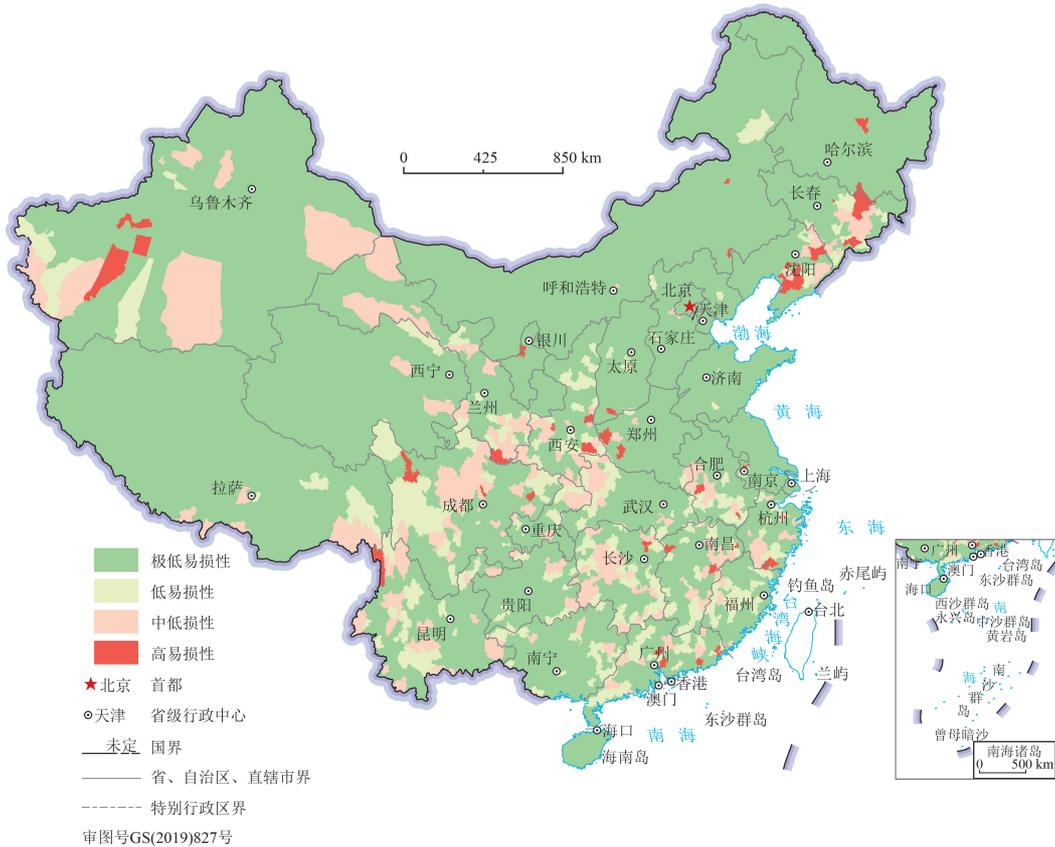


图 4 地质灾害资产易损性评价分区
Fig. 4 Zoning map of population property vulnerability assessment

表6 地质灾害资产易损性评价数据(高等级部分)
Table 6 Classification of population property vulnerability assessment(high level part)

序号	省(市、区)	市(区、州)	县(市、区)	统计威胁经济/万元	经济校正系	校正后威胁经济/万元	因灾直接经济损失/万元	资产易损性	资产易损性等级
1	新疆维吾尔自治区	阿克苏地区	阿克苏市	0.02	1.817252	0.03	96.00	19140.47313	高
2	吉林省	吉林市	船营区	30.65	0.006246	0.19	254.20	8850.72839	高
3	新疆维吾尔自治区	和田地区	墨玉县	0.31	1.817252	0.56	408.24	4843.61819	高
4	河南省	三门峡市	卢氏县	736 479.90	0.010126	7 457.69	205 353.00	183.57154	高
5	江西省	上饶市	信州区	258.81	0.007104	1.84	501.50	1818.50257	高
6	广东省	清远市	佛冈县	32.09	0.026255	0.84	201.30	1592.62881	高
7	湖南省	岳阳市	汨罗市	2 805.39	0.019268	54.06	10 553.30	1301.54969	高
8	黑龙江省	伊春市	南岔区	18.60	0.069494	1.29	200.00	1031.34436	高
9	辽宁省	抚顺市	新宾满族自治县	787 821.20	0.008758	6 900.03	1 002 377.00	968.47654	高
10	陕西省	渭南市	大荔县	48.97	0.007639	0.37	41.00	730.74400	高
11	广东省	汕尾市	陆河县	1 279.88	0.026255	33.60	1 746.00	346.39465	高
12	福建省	宁德市	寿宁县	4 108.49	0.007599	31.22	1 120.00	239.14792	高
13	浙江省	温州市	泰顺县	18 767.57	0.009817	184.24	3 050.25	110.37276	高
14	吉林省	延边朝鲜族自治州	敦化市	2 781.51	0.006246	17.37	252.00	96.69499	高
15	内蒙古自治区	通辽市	霍林郭勒市	17.06	0.029787	0.51	7.00	91.82303	高
16	湖南省	长沙市	天心区	359.28	0.019268	6.92	88.50	85.22676	高
17	广东省	广州市	增城市	2 422.14	0.026255	63.59	800.70	83.93948	高
18	辽宁省	营口市	盖州市	616 476.20	0.008758	5 399.32	61 986.90	76.53662	高
19	江西省	抚州市	南城县	65 283.25	0.007104	463.76	4 159.20	59.79011	高
20	云南省	怒江傈僳族自治州	贡山独龙族怒族自治县	71 381.22	0.056383	4 024.66	35 686.10	59.11239	高
21	四川省	德阳市	什邡市	38 578.84	0.118338	4 565.35	39 297.00	57.38439	高
22	江苏省	南京市	栖霞区	3 027.90	0.032187	97.46	809.00	55.33887	高
23	河南省	南阳市	内乡县	263 309.70	0.010126	2 666.31	20 045.00	50.11922	高
24	陕西省	宝鸡市	扶风县	17 606.11	0.007639	134.49	973.00	48.23077	高
25	江西省	宜春市	铜鼓县	31 073.59	0.007104	220.74	1 550.70	46.83361	高
26	陕西省	商洛市	山阳县	955 637.50	0.007639	7 300.07	50 511.50	46.12878	高
27	安徽省	六安市	霍山县	138 068.00	0.014819	2 046.06	12 834.90	41.81987	高
28	云南省	怒江傈僳族自治州	福贡县	89 440.92	0.056383	5 042.91	31 054.06	41.05306	高
29	宁夏回族自治区	吴忠市	青铜峡市	78.71	0.042318	3.33	20.00	40.02896	高
30	甘肃省	陇南市	文县	215 589.90	0.160459	34 593.43	178 502.40	34.40006	高
31	陕西省	西安市	灞桥区	186.61	0.007639	1.43	7.00	32.73769	高
32	四川省	甘孜藏族自治州	甘孜县	1 759.26	0.118338	208.19	1 000.32	32.03259	高
33	辽宁省	营口市	大石桥市	1 821 390.00	0.008758	15 952.40	75 000.00	31.34325	高
34	山西省	运城市	夏县	58 416.09	0.018865	1 102.04	5 071.00	30.67644	高
35	辽宁省	辽阳市	辽阳县	348 277.30	0.008758	3 050.34	13 857.00	30.28515	高
36	安徽省	黄山市	徽州区	13 707.44	0.014819	203.13	916.98	30.09449	高
37	广东省	潮州市	潮安县	22 467.65	0.026255	589.89	2 568.70	29.03024	高
38	四川省	南充市	营山县	21 426.84	0.118338	2 535.62	10 151.00	26.68912	高
39	湖南省	长沙市	雨花区	469.54	0.019268	9.05	33.00	24.31689	高
40	辽宁省	鞍山市	岫岩满族自治县	1 955 203.00	0.008758	17 124.38	53 200.00	20.71121	高
41	内蒙古自治区	赤峰市	元宝山区	23 810.96	0.029787	709.26	2 180.00	20.49075	高

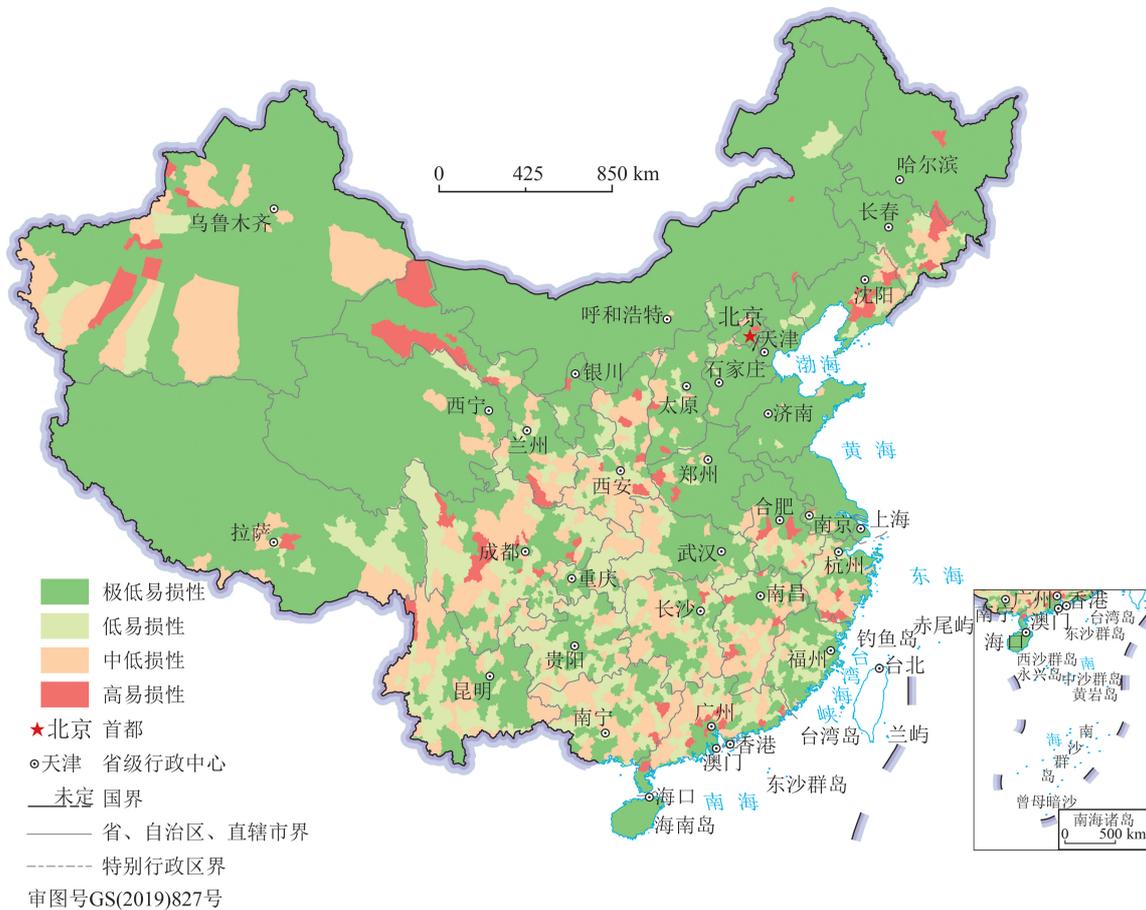


图 5 地质灾害受威胁对象易损性评价分区

Fig. 5 Zoning map of hazard-affected bodies separately vulnerability assessment

3 结论与建议

(1) 受威胁对象的易损性定量评价是地质灾害风险评估的难点关键。可将其分为人口安全易损性和资产易损性,以“因灾死亡人口比”和“因灾直接经济损失比”来量化表达。以自然资源部权威灾情数据和受威胁对象的空间化估算为基础,通过测算分别给出了二者定量分级标准及叠加原则,再结合地质灾害危险性区划进行定性综合评估,形成了以县级行政区为单元的宏观尺度地质灾害风险评估方法。此方法简便快捷,数据可连续获取、来源有制度保障。

(2) 评估结果以县为单元,适用于全国、京津冀地区等跨省区域,以及省和地市级行政区,服务于国土规划的编制和国土开发的宏观布局。较宏观的自然单元也可参照,但并不适用于独立灾害点的风险评价。

(3) 引用地质灾害威胁人口与威胁财产的权威数据是提升风险评估准确度的有效手段,目前死亡人口、因灾经济损失数据与威胁对象的统计精度不一致,因此可能会出现异常,如广东佛冈县受威胁人口仅 2 人,但年均因灾死亡人口 4 人。但全国评价结果仍可较真实地反应地质灾害风险的宏观空间差异,在现阶段不失为一种可行的方法。

(4) 部分评价单元的受威胁对象基数较低,导致在灾情相对轻微的情况下,易损性数值较高。因此,受威胁对象的基数或许也应该作为独立的评价指标纳入评价体系中,这是下一步研究的方向之一。

(5) 地质灾害高风险单元,应进一步评估灾害对国土空间开发适宜性的约束。在开发活动,尤其是场地尺度的开发前,应充分做好地质灾害详查,加强防治,排除隐患;对于中、低风险单元,评估结果是基于历史数据的相对定性结果,因此也应根据实际情况开展适度的灾害排查。

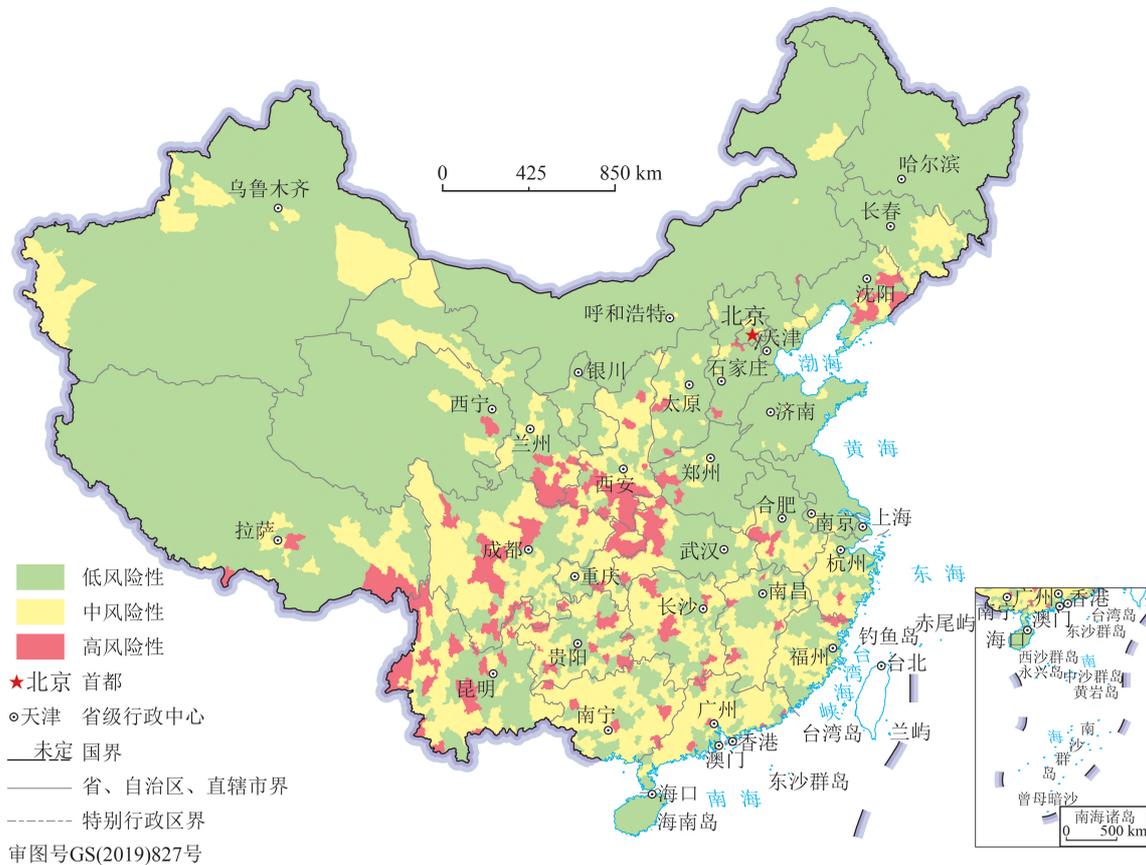


图6 地质灾害风险程度评价分区

Fig. 6 Zoning map of geological hazard risk assessment

致谢:中国地质环境监测院李瑞敏教授级高工、陈春利博士在本文的编研过程中提供了帮助和支持,新疆、内蒙古、黑龙江、辽宁、甘肃、河北、北京、河南、山东、湖北、安徽、江苏、浙江、四川、贵州、福建等省(市、区)的地质环境领域专家和相关专业技术人员在多次交流研讨中提出非常宝贵的意见和建议,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 殷坤龙,张桂荣.地质灾害风险区划与综合防治对策[J].安全与环境工程,2003,(1): 34-37.
- [2] 卢全中,彭建兵,赵法镇.地质灾害风险评估(价)研究综述[J].灾害学,2003,18,(4): 59-63.
- [3] 张茂省,岳东霞,孙萍萍,等.面向县级国土空间规划的自然资源综合调查与双评价——以延安市延川县为例[J].兰州大学学报(自然科学版),2019,(3): 281-289.
- [4] 向喜琼,黄润秋.地质灾害风险评价与风险管理[J].地质灾害与环境保护,2000,11(1): 38-41.
- [5] 孟晖,李春燕,张若琳,等.京津冀地区县域单元地质灾害风险评估[J].地理科学进展,2017,36(3): 327-334.
- [6] 李得立,李小磊,罗德江,等.基于地貌单元与灰关联分析的地质灾害风险性评价[J].地质灾害与环境保护,2019,29(4): 26-31.
- [7] 张茂省,王尧,薛强.资源环境承载力评价理论与实践[J].西北地质,2019,(2): 1-11.
- [8] Cascini L, Bonnard C, Corominas J, et al. Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development[C]//Proceeding of the international conference on landslide risk management. London: A A Balkema publishers,2005: 199-235.
- [9] Hungr O, Fell R, Couture R, et al. Landslide Risk Management[C]// Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management, London: CRC press,2005: 786.
- [10] Fell R, Corominas J, Bonnard C, et al. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning [J]. Engineering Geology, 2008, 102(3/4): 85-98.
- [11] Leroi E, Bonnard C, Fell R, et al. Risk assessment and management[M]. Weinheim: Wiley-vch verlag gmbh&co. kga, 2005: 693-694.
- [12] Jibson R, Harp E, John. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps [J]. Engineering Geology, 2000, 58(3/4): 271-289.
- [13] 张梁,张建军.地质灾害风险区划理论与方法[J].地质灾害与环境保护,2000,11(4): 323-328.
- [14] 刘传正.论地质灾害风险识别问题[J].水文地质工程地质,2017,

- 44(4): 1-7.
- [15] 向喜琼, 黄润秋. 基于 GIS 的人工神经网络模型在地质灾害危险性区划中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(3): 26-30.
- [16] 殷坤龙, 陈丽霞, 张桂荣. 区域滑坡灾害预测预警与风险评价[J]. 地学前缘, 2007, 14(6): 85-97.
- [17] 吴树仁, 石菊松, 张春山, 等. 地质灾害风险评估技术指南初论[J]. 地质通报, 2009, 28(8): 995-1005.
- [18] 吴树仁, 石菊松, 张春山, 等. 滑坡风险评估理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [19] 石菊松. 减缓新型城镇化进程中的地质灾害风险科技创新建议[J]. 科技导报, 2017, (5): 40-46.
- [20] 孟庆华, 孙炜峰, 张春山. 地质灾害风险评估与管理方法研究——以山西凤县为例[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(5): 118-124.
- [21] 徐继维, 张茂省, 范文. 地质灾害风险评估综述[J]. 灾害学, 2015(4): 130-134.
- [22] 朱良峰, 殷坤龙, 张梁, 等. GIS 支持下的地质灾害风险分析[J]. 长江科学院院报, 2002, (5): 42-45.
- [23] 马寅生, 张业成, 张春山, 等. 地质灾害风险评价的理念与方法[J]. 地质力学学报, 2004, 10(1): 7-18, 558.
- [24] 刘希林, 苏鹏程. 四川省泥石流风险评价[J]. 灾害学, 2004, 19(2): 23-28.
- [25] 李春燕, 孟晖, 张若琳, 等. 中国县域单元地质灾害风险评估[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(2): 160-166.
- [26] 石菊松, 石玲, 吴树仁. 滑坡风险评估的难点和进展[J]. 地质论评, 2007, 53(6): 797-806.
- [27] 房浩, 李媛, 杨旭东, 等. 2010—2015 年全国地质灾害发育分布特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(5): 1-6.
- [28] 殷坤龙, 朱良峰. 滑坡灾害空间区划及 GIS 应用研究[J]. 地学前缘, 2001, 8(2): 279-284.
- [29] 张春山, 张业成, 马寅生. 黄河上游地区崩塌、滑坡、泥石流地质灾害区域危险性评价[J]. 地质力学学报, 2003, 9(2): 143-153.
- [30] 李媛, 杨旭东, 孟晖. 全国突发性地质灾害造成人员伤亡分析报告[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(1): 146-147.
- [31] 张茂省, 唐亚明. 地质灾害风险调查的方法与实践[J]. 地质通报, 2008, 27(8): 109-120.
- [32] 黄润秋, 向喜琼, 巨能攀. 我国区域地质灾害评价的现状和问题[J]. 地质通报, 2004, 23(11): 1078-1082.
- ①张梁, 殷坤龙, 雷明堂. 全国地质灾害风险区划研究报告. 廊坊: 中国国土资源经济研究院, 2002.
- ②孟晖, 张若琳, 石菊松, 等. 地质环境安全综合评价方法研究成果报告. 北京: 中国地质环境监测院, 2015.