

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2024.05.014

基于子流域单元的抚顺市泥石流易发性及危险性评价

刘善军¹, 刘诗瑶¹, 魏恋欢¹, 吕东霖²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 辽宁省地矿集团能源地质有限责任公司, 辽宁 沈阳 110062)

摘要: 针对泥石流易发性及危险性评价中存在的问题,以抚顺市作为研究区,在分析泥石流灾害发育及分布规律的基础上,利用层次分析法,以子流域单元作为评价单元,开展泥石流灾害易发性及危险性评价.结合已有泥石流灾害点进行了精度评定.结果显示,抚顺市已有的42处泥石流灾害点中,36处位于本次评价的泥石流高易发和极高易发区(占比85.71%),有33处位于本次评价的泥石流高危险和极高危险区(占比78.57%).表明本次易发性及危险性评价结果比较可靠,与抚顺市的泥石流灾害发育情况相符合.

关键词: 泥石流;子流域单元;层次分析法;易发性评价;危险性评价

中图分类号: X 43;P2 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)05-0713-08

Debris Flow Susceptibility and Hazard Assessment in Fushun City Based on Hydrological Response Units

LIU Shan-jun¹, LIU Shi-yao¹, WEI Lian-huan¹, LYU Dong-lin²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Liaoning Province Geology and Mineral Group Energy Geology Co., Ltd., Shenyang 110062, China. Corresponding author: LYU Dong-lin, E-mail: lvdonglin@163.com)

Abstract: Targeting at the problems of fuzzy evaluation system and neglect of triggering factors such as rainfall in the susceptibility and hazard assessment of debris flows, a study was conducted in the Fushun City based on analysis of the development and distribution patterns of debris flow disasters, the analytic hierarchy process method was utilized to assess the susceptibility and disasters of debris flow, using hydrological response units as evaluation units. The assessment accuracy is evaluated by incorporating existing debris flow disaster points. The results show that among the 42 existing debris flow disaster points, 36 are located in the high and extremely high susceptibility areas (accounting for 85.71%), and 33 are located in the high and extremely high hazard areas (accounting for 78.57%). This indicates that the susceptibility and hazard assessment results are reliable and consistent with the current development situation of debris flow disasters in Fushun City.

Key words: debris flow; hydrological response unit; analytic hierarchy process; susceptibility assessment; hazard assessment

泥石流是一种由暴雨触发的携带有大量泥沙及石块的沿坡面或沟谷流动的固、液、气混合洪流,易发于地形地貌条件复杂的山区,具有突发性、流速快、流量大、物质容量大和破坏性强等特点^[1].2010年8月7日,甘南藏族自治州舟曲县

县城东北部山区突降特大暴雨,引发特大泥石流地质灾害,其流经区域被夷为平地,当地民众遇难1481人,失踪284人^[2].2013年8月16~17日,抚顺市强降雨引发的大洪水和泥石流共损毁房屋6.17万间,冲毁公路31条次,冲毁桥涵47座,

收稿日期: 2022-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42071453).

作者简介: 刘善军(1965-),男,河北涿鹿人,东北大学教授,博士生导师.

造成了 100 多人死亡^[3].2019 年 8 月 20 日四川省汶川县突降暴雨,全县 8 个乡镇发生山洪及泥石流灾害,造成多条道路中断、电力中断,共计 12 人遇难、28 人失联,全县直接经济损失高达 14 亿元^[4].由此可见,泥石流灾害的危害性极大,开展泥石流灾害危险性评价可为灾害防治提供科学依据,保障人民的生命财产安全.

国外的泥石流危险性评价研究发展较早.1981 年,Hollingsworth 等^[5]采用评分制构建了泥石流危险评价体系,并使用因子叠加法获取了危险程度评价.我国的泥石流危险性评价研究始于 1986 年,谭炳炎^[6]提出了泥石流数量化综合评判方法,并将其应用于铁路部门.1995 年,刘希林等^[7]著述《泥石流危险性评价》一书,采用定量数据、定性评述进行多因子综合评判.近年来,泥石流危险性评价研究大致从如下几个方面开展:一是评价单元划分方法研究,出现了单沟泥石流单元、栅格单元、子流域单元等划分方法;二是评价方法研究,如灰色关联度法^[8]、层次分析法^[9]、模糊综合评判法^[10]、遥感与地理信息系统结合法^[11]、模糊神经网络^[12]、数值模拟法^[13]等;三是针对评价过程中的细节开展研究,包括评价因子权重计算方法研究^[14]、因子敏感性分析^[15]、因子相关性处理^[16]、不同限制条件下的分级评价方法^[17]等.

现有研究大多未对泥石流评价体系进行梳理,仅进行了泥石流危险性评价,没有针对泥石流灾害的易发性进行评价,模糊了泥石流灾害诱发因素的重要性.如果仅参考泥石流危险性评价结果开展防灾减灾工作,经常存在某个区域危险性高但实际泥石流易发性低的问题,造成明显的减灾资源浪费,影响灾害防治措施的制定.

针对上述问题,本研究以辽宁省抚顺市为研究区,以子流域单元作为评价单元,在分析抚顺市泥石流灾害发育及分布规律的基础上,利用层次分析法开展泥石流灾害易发性评价.在易发性评价的基础上,结合降雨这一泥石流关键诱发因素,进行泥石流危险性评价.本文同时开展易发性及危险性评价,可全面掌握抚顺市的泥石流灾害发育情况,为泥石流灾害防治提供更加精准的数据支撑.

1 研究区及数据概况

1.1 抚顺市自然环境概况

抚顺市位于辽宁省东北部,下辖四区三县,

包括抚顺市内四区、抚顺县、新宾满族自治县(简称新宾县)和清原满族自治县(简称清原县),总面积 11 271.5 km².抚顺市地形地貌以低山和丘陵为主,为泥石流灾害发育提供了地形条件.受温带大陆性季风气候的影响,抚顺市四季分明,雨热同期,夏季平均降水 454 mm,占全年降水的三分之二,常出现短时强降雨现象,为泥石流灾害提供了诱发条件.2013 年夏季,抚顺市连日的暴雨天气导致泥石流灾害爆发,共计 204 个村庄受到波及,造成了严重的人员伤亡和经济损失.

1.2 抚顺市泥石流发育及分布规律

抚顺市位于辽河平原与长白山脉交汇处、华北地震带东北段,地质构造复杂.地表覆盖多为第四系及严重风化的变质岩,为泥石流灾害提供了充足的物源条件.截至 2021 年,抚顺市共发现泥石流灾害点 42 处(如图 1 所示),其中抚顺市区 2 处、抚顺县 11 处、新宾县 17 处、清原县 12 处.

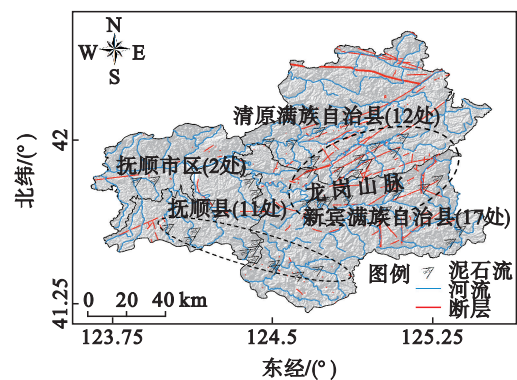


图 1 抚顺市泥石流灾害分布

Fig. 1 Distribution of debris flow disasters in Fushun City

抚顺市的泥石流灾害主要分布于 2 处密集孕灾区.一处是位于清原满族自治县与新宾满族自治县交界处的龙岗山脉南北两侧,呈东西走向条带状分布.该区域沟谷众多、断层交错、风化变质岩广泛分布,符合泥石流孕灾条件.另一处是位于抚顺县东南至新宾县西南部,呈北西-南东走向的条带状分布,泥石流灾害多发于第四系地层、分布于河流两侧.

1.3 数据概况

本研究使用的数据主要包括 SRTM DEM、Landsat 8 影像、抚顺地区 1:200 000 区域地质图、抚顺市 2013 年 8 月 16~17 日 48 小时降雨量. DEM 数据分辨率为 30 m,主要用于评价单元划分及评价所需的地形地貌因子计算. Landsat 8 卫星影像主要用于计算研究区的植被覆盖度.抚顺地区 1:200 000 区域地质图主要用于提取研究区的地

层岩性及断层构造.抚顺市 2013 年 8 月 16~17 日 48 小时降雨量及各站点的位置由抚顺市气象局提供.此外,本文还收集了研究区内的已有泥石流灾害点资料,主要用于泥石流灾害发育和分布规律总结,以及泥石流危险性评价结果验证.

2 研究方法

根据泥石流灾害调查实际情况及《地质灾害风险调查评价技术要求 1:50 000》^[18],本次泥石流易发性及危险性评价选取的孕灾条件因子主要为地形地貌、地质条件和植被覆盖度.泥石流灾害诱发因子选取 2013 年 8 月 16~17 日 48 小时降雨量.本文的总体研究思路如图 2 所示.对泥石流灾害孕灾条件因子及诱发因子进行数据处理,并结合研究区实际情况进行因子分级.建立泥石流灾害评价体系,采用层次分析法对各条件因子进行定权.对各孕灾条件因子进行加权叠加,实现泥石流灾害易发性评价.在易发性评价结果基础上,结合诱发因子进行泥石流灾害危险性评价.

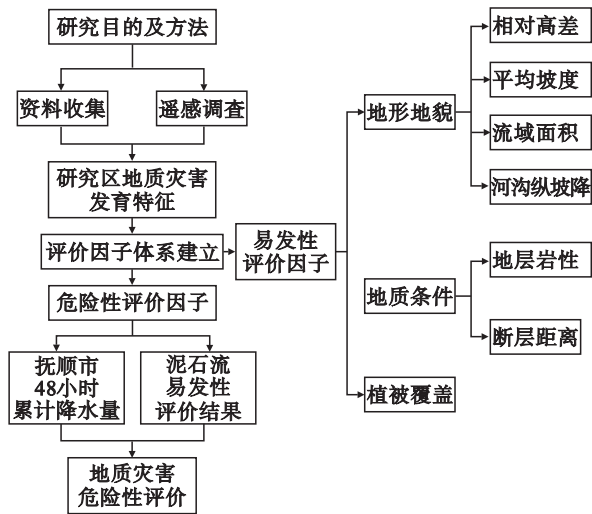


图 2 泥石流灾害评价方法

Fig. 2 Evaluation method of debris flow disasters

评价过程中涉及的关键步骤包括:评价单元划分、评价因子选取及因子分级、评价因子权重计算、评价模型选择.

2.1 评价单元划分

在现有泥石流灾害评价研究中,评价单元多采用栅格单元、单沟泥石流单元及子流域单元.栅格单元具有方便快捷的优势,广泛应用于泥石流危险性评价.栅格单元的缺点是忽略了地形地貌的整体性,导致划分结果无法与实际地形相联系.单沟泥石流单元划分具有很强的针对性,评

价结果准确性高,但不适宜开展大范围的泥石流灾害评价.子流域单元是根据研究区的地形地貌特征及水文要素,划分出反映真实山沟山谷特征的子流域.子流域单元的划分尺度灵活性较高,可以根据研究区的范围大小进行调整.此外,由于子流域是泥石流发育和活动的基本单元,子流域单元更加适用于泥石流易发性及危险性评价.因此,本文选取了子流域单元作为泥石流灾害评价单元.

本文利用 DEM 数据,采用分布式水文模型构建方法^[19],对研究区进行子流域单元划分,并结合研究区实际情况进行了人工修正.最终,将抚顺市研究区划分为 452 块子流域单元,各子流域单元的面积在 0.26~140 km² 之间,如图 3 所示.

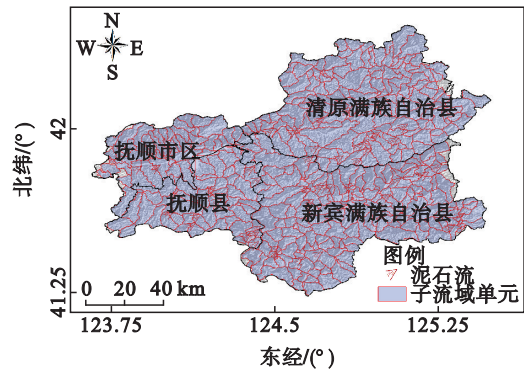


图 3 抚顺市子流域单元划分结果

Fig. 3 Division results of the hydrological response units in Fushun City

2.2 评价因子选取

影响泥石流灾害发生的因素主要包括地形地貌、地质条件、植被覆盖、人类活动和降雨 5 个方面.地形地貌对泥石流灾害的物源储量具有重要影响.相对高差大、坡度较陡的斜坡稳定性差,易发生滑动形成松散堆积物.同时,位于相对高差较大区域的物源重力势能较大,泥石流造成的危害也越大.地质条件是地质灾害的主要影响因素之一.构造断层多的区域构造活动多,易发生地质灾害.第四系、变质岩区域的岩性软弱,风化剥蚀程度高,为泥石流灾害的发生提供了物源基础.植被覆盖具有固结土壤的作用.植被覆盖度较低的区域,地表裸露的松散物质在雨水的冲刷下,沿坡体及沟谷流动汇集,易形成泥石流灾害.由于采矿等人类活动的影响,自然地貌及植被覆盖情况遭到破坏,会加剧泥石流灾害的发生.降雨是泥石流灾害的关键诱发因子,大型泥石流灾害往往是由短时强降雨引发的,大量的水流携带充足的物源沿流域汇集,就形成了泥石流灾害.

综上,本文依据文献[18]、《滑坡崩塌泥石流灾害调查规范(1:50 000)》^[20]等,结合研究区实际情况将泥石流易发性影响因素细分为7项评价因子指标,包括相对高差、平均坡度、流域面积、河沟

纵坡降、地层岩性、断层距离和植被覆盖度.依据表1和表2中的等级划分标准,可将每项因子指标进行易发性和危险性分级,分为低、中、高、极高4个等级.

表1 泥石流易发性评价因子分级
Table 1 Classification of debris flow susceptibility assessment factors

| 易发性评价指标 | 等级划分 | | | |
|----------------------|--------|-------------|-----------|-------|
| | 低 | 中 | 高 | 极高 |
| 相对高差/m | <100 | 100~300 | 300~500 | >500 |
| 平均坡度/(°) | <7 | 7~12 | 12~15 | >15 |
| 流域面积/km ² | >100 | 10~100 | 5~10 | <5 |
| 河沟纵坡降/(°) | <3 | 3~6 | 6~12 | >12 |
| 地层岩性 | 中酸性岩浆岩 | 沉积岩 | 变质岩 | 第四系 |
| 断层距离/m | >3 000 | 1 500~3 000 | 500~1 500 | 0~500 |
| 植被覆盖度 | >0.6 | 0.3~0.6 | 0.1~0.3 | <0.1 |

表2 泥石流危险性评价因子分级
Table 2 Classification of debris flow hazard assessment factors

| 诱发因素评价指标 | 等级划分 | | | |
|-----------|------|--------|---------|------|
| | 低 | 中 | 高 | 极高 |
| 48小时累计降雨量 | 0~50 | 50~100 | 100~200 | >200 |

表4 泥石流危险性评价判断矩阵
Table 4 Judgment matrix for debris flow hazard assessment

| 泥石流危险性评价 | 易发性评价结果 | 诱发条件 |
|----------|---------|------|
| 易发性评价结果 | 1 | 2/3 |
| 诱发条件 | 3/2 | 1 |

2.3 评价因子权重计算

采用层次分析法进行评价因子权重计算.层次分析法是美国运筹学家萨蒂于20世纪70年代提出的一种层次权重决策分析方法^[21].层次分析法实施过程中的关键步骤是判断矩阵的构建.判断矩阵是由矩阵元素标度值组成的方阵,标度的具体含义及赋值采用萨蒂提出的1~9标度比较表.构建的判断矩阵只要能够通过一致性检验,即为合理的判断矩阵.

针对抚顺市研究区,本文依据上述泥石流危险性评价体系,结合专家意见构建了各层次的判断矩阵(如表3~表6所示),并通过了一致性检验.计算得出的评价因子权重如表7和表8所示.

表3 泥石流易发性评价判断矩阵
Table 3 Judgment matrix for debris flow susceptibility assessment

| 泥石流易发性指标 | 地形地貌 | 地质条件 | 植被覆盖度 |
|----------|------|------|-------|
| 地形地貌 | 1 | 2 | 2 |
| 地质条件 | 1/2 | 1 | 1 |
| 植被覆盖度 | 1/2 | 1 | 1 |

表5 地形地貌因子判断矩阵

Table 5 Judgment matrix of landform factors

| 地形地貌 | 相对高差 | 平均坡度 | 流域面积 | 河沟纵坡降 |
|-------|------|------|------|-------|
| 相对高差 | 1 | 1/2 | 3/4 | 6/5 |
| 平均坡度 | 2 | 1 | 8/3 | 5/3 |
| 流域面积 | 4/3 | 3/8 | 1 | 3/5 |
| 河沟纵坡降 | 5/6 | 3/5 | 5/3 | 1 |

表6 地质条件因子判断矩阵
Table 6 Judgment matrix of geological condition factors

| 地质条件 | 地层岩性 | 断层距离 |
|------|------|------|
| 地层岩性 | 1 | 7/3 |
| 断层距离 | 3/7 | 1 |

表7 泥石流易发性评价因子权重
Table 7 Weights of debris flow susceptibility assessment factors

| 一级指标 | 一级权重 | 二级指标 | 综合权重 |
|-------|------|-------|-------|
| 地形地貌 | 0.5 | 相对高差 | 0.098 |
| | | 平均坡度 | 0.200 |
| | | 流域面积 | 0.089 |
| | | 河沟纵坡降 | 0.113 |
| 地质条件 | 0.25 | 地层岩性 | 0.175 |
| | | 断层距离 | 0.075 |
| 植被覆盖度 | 0.25 | — | 0.250 |

2.4 泥石流易发性及危险性评价模型

在进行易发性评价时,采用分区统计工具将上述7项评价因子归算至子流域单元.按照泥石流易

表 8 泥石流危险性评价因子权重
Table 8 Weights of debris flow hazard assessment factors

| 评价指标 | 综合权重 |
|---------|------|
| 易发性评价结果 | 0.6 |
| 诱发条件 | 0.4 |

发性分级方法进行赋值.依据层次分析法计算出的权重,进行加权求和,计算方法如公式(1)所示.

$$R_i = \sum_{i=1}^n \omega_i X_i. \quad (1)$$

式中: R_i 为泥石流易发性评价结果,其数值越大,代表泥石流易发性越高; ω_i 和 X_i 分别为第 i 个泥石流易发性评价因子所对应的权重及等级值.

依据上述模型计算出的泥石流易发性数值,采用自然断点法分为极高、高、中、低 4 个等级,最终得到泥石流易发性评价结果.基于易发性评价结果,叠加泥石流诱发条件因子,采用加权求和

方式进行泥石流灾害危险性评价.

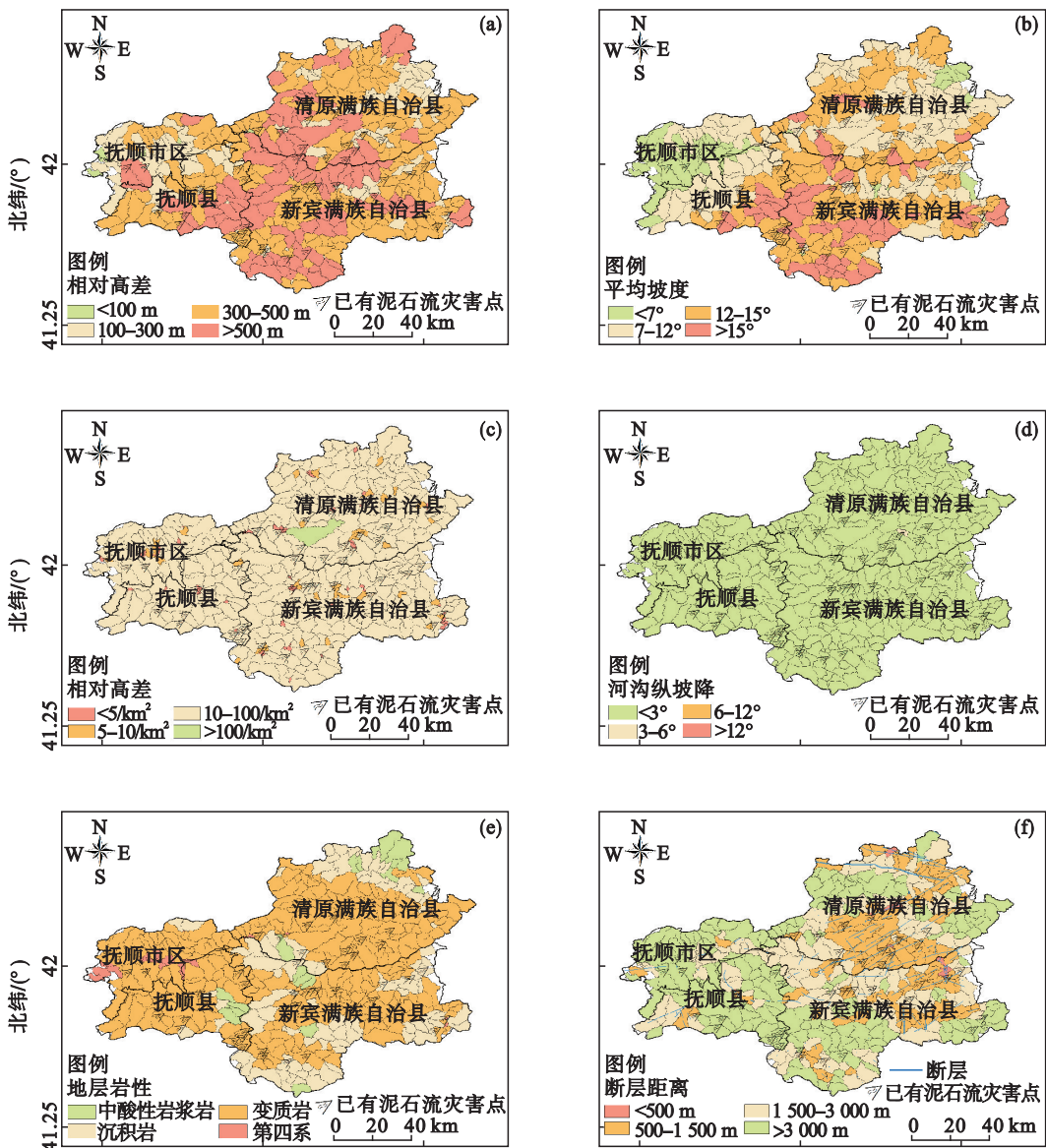
3 泥石流易发性及危险性评价

3.1 评价因子分级

为了开展泥石流易发性及危险性评价,本文分别计算各易发性因子图层数据,然后依据表 1 及表 2 进行了因子分级,结果如图 4 所示.

3.2 泥石流灾害易发性及危险性评价结果

抚顺市泥石流灾害易发性评价结果如图 5 所示.由图可见,清原县及新宾县的泥石流灾害易发性明显高于抚顺市区及抚顺县.极高易发性区域在清原县浑河断裂带沿线、清原县与新宾县交界处附近(木奇镇、永陵镇、新宾镇、南口前镇、大苏河乡)呈带状分布、抚顺县东南至新宾县西南(马圈子乡-大四平镇)呈带状分布.与泥石流灾害分布规律一致.



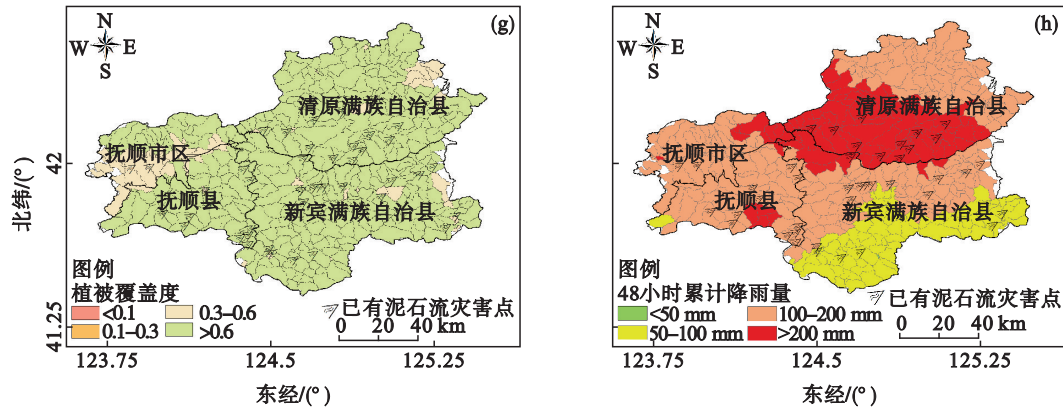


图 4 抚顺市泥石流危险性评价因子等级

Fig. 4 Grades of debris flow hazard assessment factors in Fushun City

(a)—相对高差等级; (b)—平均坡度等级; (c)—流域面积等级; (d)—沟谷纵坡降等级;
(e)—地层岩性等级; (f)—断层距离等级; (g)—植被覆盖度等级; (h)—48小时累计降雨量等级.

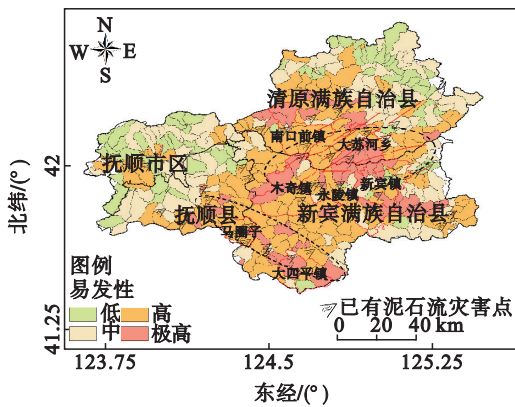


图 5 抚顺市泥石流易发性结果

Fig. 5 Results of debris flow susceptibility in Fushun City

在泥石流易发性评价结果的基础上,结合诱发因子图层(48小时累计降雨量),进一步加权计算得出了泥石流灾害危险性评价结果,如图6所示.评价结果表明,泥石流灾害危险性极高处主要为抚顺市区的哈达镇、章党镇;抚顺县的后安镇;新宾县的南杂木镇、木奇镇、新宾镇;清原县南部区域.

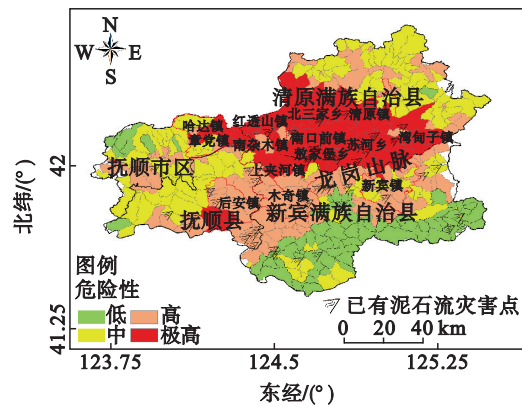


图 6 抚顺市泥石流危险性结果

Fig. 6 Results of debris flow hazard in Fushun City

按县区及级别对抚顺市的泥石流易发性评价结果进行了统计,如表9所示.抚顺市区、抚顺县、新宾县、清原县的高易发及极高易发区分别占区域总面积的 2.67%, 7.63%, 28.69% 和 18.72%. 新宾县泥石流易发性最高,清原县泥石流易发性次之,两县泥石流易发性明显高于抚顺市区和抚顺县.

表 9 抚顺市泥石流易发性分区统计
Table 9 Statistics of debris flow susceptibility zoning in Fushun City

| 区域 | 低易发区面积/km ² | 中易发区面积/km ² | 高易发区面积/km ² | 极高易发区面积/km ² | 合计面积/km ² |
|--------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|
| 抚顺市区 | 546.36 | 481.22 | 290.96 | 4.67 | 1 323.20 |
| 抚顺县 | 288.57 | 555.02 | 706.94 | 107.37 | 1 657.90 |
| 新宾县 | 168.92 | 855.13 | 2 122.38 | 1 052.13 | 4 198.56 |
| 清原县 | 646.79 | 1 165.59 | 1 567.34 | 503.61 | 3 883.32 |
| 合计面积 | 1 650.63 | 3 056.96 | 4 687.61 | 1 667.78 | 11 062.98 |
| 合计比例/% | 14.92 | 27.63 | 42.37 | 15.08 | 100.00 |

按县区及级别对抚顺市的泥石流危险性评价结果进行了统计,如表10所示.抚顺市区、抚顺县、新宾县、清原县的极高危险区分别占区域总

面积的 14.15%, 7.57%, 6.81% 和 51.86%. 其中,清原县极高危险区域明显高于其他县区,主要是由于抚顺市近年来的短时强降雨(48小时降雨量)

最大值位于清原县南部.结合泥石流灾害易发性评价结果,在短时强降雨诱发条件下,清原县的泥石流灾害危险性更高.新宾县的极高危险区均

在与清原县交界的龙岗山脉一带,而抚顺市区及抚顺县相对危险性较小.

表 10 抚顺市泥石流危险性分区统计
Table 10 Statistics of debris flow hazard zoning in Fushun City

| 区域 | 低危险区面积/km ² | 中危险区面积/km ² | 高危险区面积/km ² | 极高危险区面积/km ² | 合计面积/km ² |
|--------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|
| 抚顺市区 | 166.03 | 680.86 | 289.02 | 187.29 | 1 323.20 |
| 抚顺县 | 43.34 | 736.49 | 752.63 | 125.43 | 1 657.90 |
| 新宾县 | 1 564.85 | 679.98 | 1 667.84 | 285.88 | 4 198.56 |
| 清原县 | 24.72 | 1 257.75 | 586.80 | 2 014.05 | 3 883.32 |
| 合计面积 | 1 798.95 | 3 355.08 | 3 296.29 | 2 612.66 | 11 062.98 |
| 合计比例/% | 16.26 | 30.33 | 29.80 | 23.62 | 100.00 |

3.3 评价结果精度

为评价易发性及危险性结果的精度,根据已有灾害点资料进行了统计,如表 11 和表 12 所示.抚顺市泥石流灾害高易发区面积 4 687.61 km²,占总面积的 42.37%;极高易发区面积 1 667.78 km²,占总面积的 15.08%.目前已有的 42 处泥石流灾害点中,有 36 处位于本次评价的泥石流高易发区或极高易发区(占比 85.71%),表明本文的易发性评

价结果与抚顺市的泥石流灾害发育现状较吻合.

抚顺市泥石流灾害高危险区面积 3 296.29 km²,占总面积的 29.80%;泥石流灾害极高危险区面积 2 612.66 km²,占总面积的 23.62%.目前已有的 42 处泥石流灾害点中,有 33 处位于泥石流高危险区或极高危险区(占比 78.57%),表明本文的危险性评价结果与抚顺市的泥石流灾害发育现状较吻合.

表 11 抚顺市泥石流易发性评价结果统计
Table 11 Statistics of debris flow susceptibility in Fushun City

| 易发性分区 | 面积/km ² | 易发区占比/% | 已有泥石流灾害点数量/处 | 灾害点占比/% |
|-------|--------------------|---------|--------------|---------|
| 低易发区 | 1650.63 | 14.92 | 3 | 7.14 |
| 中易发区 | 3056.96 | 27.63 | 3 | 7.14 |
| 高易发区 | 4687.61 | 42.37 | 24 | 57.14 |
| 极高易发区 | 1667.78 | 15.08 | 12 | 28.57 |

表 12 抚顺市泥石流危险性评价结果统计
Table 12 Statistics of debris flow hazard in Fushun City

| 危险性分区 | 面积/km ² | 危险区占比/% | 已有泥石流灾害点数量/处 | 灾害点占比/% |
|-------|--------------------|---------|--------------|---------|
| 低危险区 | 1798.95 | 16.26 | 4 | 9.52 |
| 中危险区 | 3355.08 | 30.33 | 5 | 11.90 |
| 高危险区 | 3296.29 | 29.80 | 20 | 47.62 |
| 极高危险区 | 2612.66 | 23.62 | 13 | 30.95 |

4 结 论

1) 将子流域单元作为泥石流评价单元,能够体现研究区地形地貌水文条件,更好地反映微地貌对泥石流灾害形成和发育的作用.

2) 评价因子权重计算采用层次分析法,通过构建各层次判断矩阵,进行各因子的权重计算及一致性检验,可使评价过程更加客观,得到的评价结果也更加准确.

3) 抚顺市的泥石流高易发区和极高易发区分布有 85.71%的泥石流灾害点,高危险区和极高

危险区分布有 78.57%的泥石流灾害点,表明评价结果与抚顺市的泥石流灾害发育现状相符合.

参考文献:

[1] Iverson R M. The physics of debris flows [J]. *Reviews of Geophysics*, 1997, 35(3): 245-296.
 [2] Tang C, Rengers N, van Asch T W J, et al. Triggering conditions and depositional characteristics of a disastrous debris flow event in Zhouqu City, Gansu Province, northwestern China [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, 11(11): 2903-2912.
 [3] 张宏建,李贵阳,潘俊,等.抚顺市“8·16”特大暴雨山洪灾害调查分析[J]. *农业科技与装备*, 2013(11): 54-56.
 (Zhang Hong-jian, Li Gui-yang, Pan Jun, et al. Analysis of

