

煤矿采空塌陷区山洪危险性评价

曹琛, 陈剑平, 宋盛渊, 郑莲婧

(吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130026)

摘 要: 利用层次分析法和山洪危险性指标体系, 将 ArcGIS 空间分析模块运用到西区沟小流域危险性分区制图中. 山洪危险性指标体系包括高程、采空危险分区、起伏度、植被类型、降雨强度、岩土类型和坡度 7 个指标, 根据各指标不同等级影响洪水危险性的严重程度进行赋值. 结合指标权重值, 将指标系统进行数据叠加, 获取山洪危险性分区图. 最后将分区结果与历史洪水事件记录做验证对比, 其结果与实际情况具有较好的一致性, 该方法对西区沟的山洪危险性评价实用有效.

关 键 词: 山洪; 危险性评价; 指标体系; 采空塌陷区; 层次分析法

中图分类号: TV 122

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)11-1620-05

Flash Flood Hazard Assessment in Coalmine Goaf Catchment

CAO Chen, CHEN Jian-ping, SONG Sheng-yuan, ZHENG Lian-jing

(College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China. Corresponding author: CHEN Jian-ping, professor, E-mail: chenjpwq@126.com)

Abstract: The analytic hierarchy process (AHP) and the FFHIS (flash flood hazard index-based system) were applied for producing flash flood hazard zoning map in Xiqu gully by the ArcGIS software. The proposed index-based system processes information of seven parameters, namely, elevation, coalmine goaf risk zoning, waviness, vegetation types, rainfall intensity, soil types and slope angle. The assignment of different levels in the same parameter was based on the different severity. Based on the weight values, the data was superimposed to obtain the flash flood hazard zoning map. The historical flood events were used for validation. The validation showed that the flash flood hazard zoning map was consistent with the actual situations. The proposed index-based system and method were practical and effective for flash flood hazard assessment in Xiqu Gully.

Key words: flash flood; hazard assessment; index-based system; coalmine goaf catchment; the analytic hierarchy process

山洪是山区中小流域由于强降雨引起的突发性洪水. 近年来, 由于极端天气的增多, 经常发生突发性的暴雨事件, 导致山洪发生. 山洪灾害具有无序的突发性、明显的多发性以及强烈的破坏性, 导致防御山洪十分困难.

对于小流域山洪危险性评价而言, GIS 技术已经被广泛应用于山洪和洪水的评价与预测中^[1-2]. GIS 数字高程模型与实测的山洪水位和洪峰的结合可以准确模拟山洪泛滥的范围, 并计算淹没深度^[3]; 目前国内外众多学者在这方面做了大量的研究, 统计分析法、模糊评判法、层次分

析法等都是一些比较常用的方法^[4]. 在一定程度上, 这些方法能够评价山洪灾害所在流域的危险性等级大小, 但由于山洪灾害的形成受多种因素的影响, 同一因素又包含不同的表现形式, 并且地区的差异性也比较大, 山洪灾害评价具有十分复杂的特性.

在北京市房山区西区沟小流域内有大面积的煤炭采空塌陷区, 对采空塌陷区的小流域进行山洪危险性评价的研究很少. 地下采空区的存在, 特别是当采空区地表出现变形裂缝与塌陷坑的情况下, 这些裂缝与塌陷坑会成为地表水导入地下的

直接通道. 这些原因会直接影响该流域内的山洪危险性的评价结果, 从而影响当地居民防洪防汛的措施. 此外, 这些原本应该形成地表径流的水, 涌入地下后可能会对西区沟内的其他地区造成更多的地表塌陷, 对当地居民造成一定的安全隐患. 为了准确地评价西区沟的山洪危险性分区特点, 本文针对西区沟的特点, 考虑包括采空危险分区在内的 7 个评价因素, 通过层次分析法与指标体系, 运用 GIS 对西区沟进行山洪危险性评价, 并绘制西区沟的山洪危险性分区图. 通过现场地质调查验证, 该分区图准确有效, 能够较好地反映西区沟内各个地区的山洪危险程度.

1 工程概况

西区沟位于北京市房山区河北镇, 其形态和数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 如图 1 所示. 沟内有 4 个自然村, 由于先前大量的煤矿开采, 尾矿矿渣煤矸石大量堆积, 并存在大量的地裂缝和地面塌陷 (图 2).

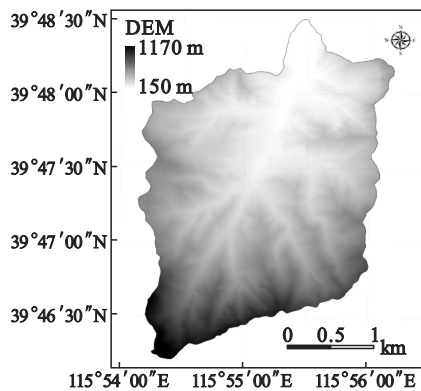


图 1 西区沟小流域形态及 DEM

Fig. 1 Catchment shape and DEM in Xiqu gully

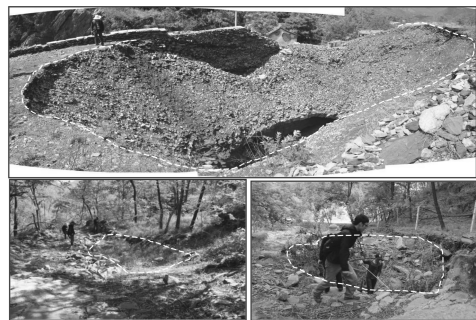


图 2 西区沟的矿区地面塌陷

Fig. 2 Land collapse in mining area of Xiqu gully

研究区的大地构造位置属于燕山台褶带西山拗褶区, 以山地为主, 平地较少. 本区气候属温带半湿润—半干旱大陆性季风气候, 气温为 $-22.9 \sim 40.2^{\circ}\text{C}$. 年降雨量可达 $600 \sim 800\text{ mm}$. 研究区内

的岩性主要有中上元古界以青白口系 (Zq) 砂岩; 古生界寒武系 (Є) 灰岩、奥陶系 (O) 白云岩; 石炭系 (C) 和二叠系 (P) 的粉砂岩; 侏罗系 (J) 的砂岩夹砾岩.

2 层次分析法

层次分析法是由 Saaty^[5] 在 20 世纪 70 年代提出的一种定性定量相结合、系统化决策方法. 其原理是根据具体问题的实质及决策要求达到的目标, 将问题划分为不同的指标, 按照指标之间的相互影响及隶属关系进行组合, 形成一个多层次的递阶结构, 在此基础上进行定性和定量分析. 利用层次分析法来建立权重体系已经被广泛应用^[6-7].

层次分析法赋权的步骤为: ①根据指标系统中各指标之间的关系建立层次结构; ②从层次结构模型的第二层开始判断量化. 在同一层次中采用 1~9 标度的方法, 根据某一准则, 将各个因子进行两两比较, 构造判断矩阵; ③根据层次分析法的基本原理, 判断矩阵 A 应满足:

$$A\omega = \lambda_{\max}\omega. \tag{1}$$

式中, ω 为构造矩阵 A 的最大特征根 λ_{\max} 对应的特征向量. 为了检验判别一致性, 引入量度判断矩阵的偏离一致性指标 CI :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}. \tag{2}$$

为了确定不同阶数的判断矩阵能否满足满意的一致性, 引入平均随机一致性指标 RI , 其值如表 1 所示. 随机一致性之比 CR 为

$$CR = CI/RI. \tag{3}$$

如果 $CR < 0.1$, 则判断矩阵满足一致性检验, 这意味着因子权重的设定比较合理.

表 1 随机一致性指标 (RI)							
Table 1 Consistency random indicator (RI)							
阶数	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

3 山洪危险性评价指标体系

3.1 数据来源和指标选取

山洪危险性评价指标系统的建立需要选取相关的影响因子作为评价指标. 指标的选取主要是基于前人对山洪灾害的研究^[2,7-9], 根据研究区域的特点, 从地形地貌、降水、植被类型和人类活动影响等方面考虑山洪危险性. 地形地貌因子包括高程、坡度和起伏度. 降水是山洪致灾的主要因

素,本文选取了降雨强度作为评价指标.植被类型包括耕地、果园、森林、少量杂草和无植被,各植被类型的植被覆盖度不同,对降雨的截留和蓄水能力也不同,同时也影响着降雨汇流的时间和大小.此外,本文将采空危险分区这一因素考虑进山洪的危险性评价指标体中.因此选取 7 个评价指标,分别是高程、起伏度、采空危险分区、植被类型、降雨强度、岩土类型和坡度.以上指标均利用

ArcGIS 软件进行栅格处理,栅格大小 $2.5\text{ m}\times2.5\text{ m}$.在西区沟内没有河流,所以此处并未考虑该指标.指标体系中的 7 个评价指标分类如图 3 所示,表 2 为各类等级划分和赋值.

1) 高程.西区沟小流域内降雨后,水流会从高程高处流向低处,地势较低处地区洪水淹没的速度要比地势高的地区要大很多.地势低处的危险性大,分配的危险值就高.

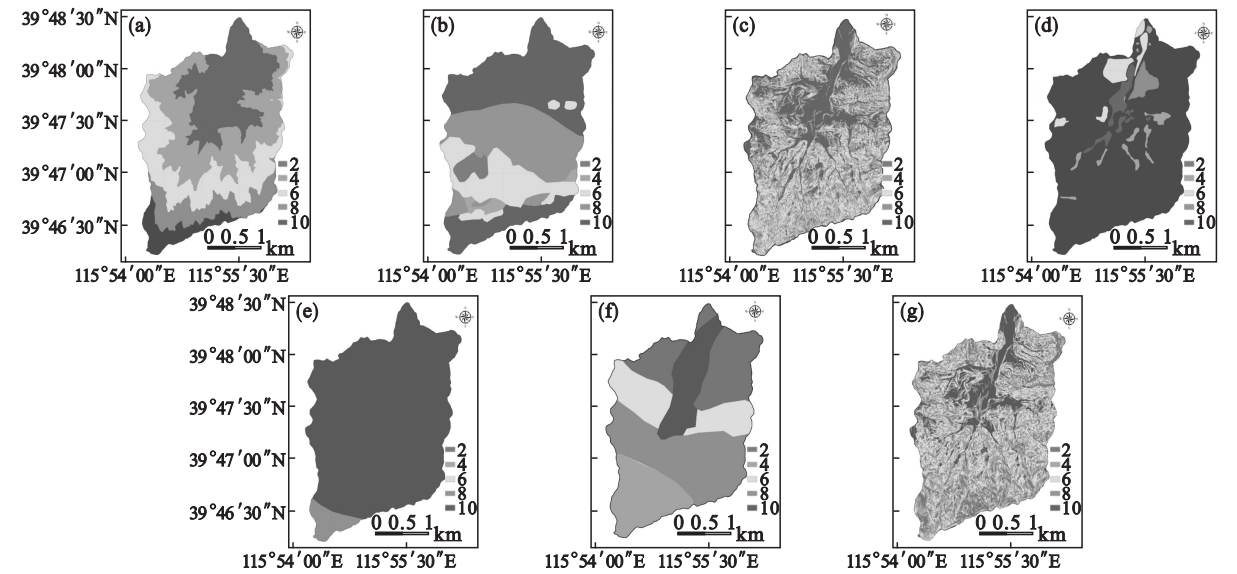


图 3 西区沟指标体系图
Fig. 3 Index-based system maps of Xiqu gully
(a)—高程;(b)—采空区;(c)—起伏度;(d)—植被类型;
(e)—降雨强度;(f)—岩土类型;(g)—坡度.

表 2 各参数的等级划分及赋值
Table 2 Classes of the parameters and assignments

指标(赋值)	低度危险(2)	轻度危险(4)	中度危险(6)	重度危险(8)	极度危险(10)
高程/m	814~1 170	618~814	450~618	306~450	150~306
采空区	极度危险	重度危险	中度危险	轻度危险	无危险
起伏度/m	9.8~27.2	6.4~9.8	4.3~6.4	2.2~4.3	0~2.2
植被类型	森林	果园	耕地	少量杂草	无植被
降雨量/mm	<400	400~500	500~600	600~700	>700
岩土类型	硬岩	砾类土	黏性土	粉砂~黏土	砂类土
坡度/(°)	78~48	48~37	37~26	26~14	14~0

2) 采空危险性分区.由于常年采煤导致地表塌陷,使得在强降雨作用下,短时间内即有大量降雨入渗崩坡积体内,显著降低这部分崩坡积物的稳定性.本文采空区危险等级采用张长敏^[10]根据多种影响采空塌陷的因素综合计算方法,其危险性分为 5 个等级.山洪是一种地表水的流动现象,极度危险的采空塌陷区,地表水顺着塌陷坑或地裂缝流入地下,由地表洪水转成地下涌水,此时山洪危险性被削弱,故极度危险的采空塌陷山洪危险性最低.中度危险的采空塌陷区地表水渗入到

地下后,崩塌会将塌陷坑或地裂缝填堵,致使地表水再次汇聚,故中度危险的采空危险分区属于中度危险.而在无采空塌陷区内,地表水除了正常的人渗之外,没有大量的地表水的损失,所以无采空塌陷的区域的山洪危险性最高.

3) 起伏度.地形变化小的地区,水流缓慢,积水不易迅速排出,水量较大会十分容易造成淹溺水毁.地形的变化一般由地形起伏度来表示,地形起伏度越小,表明该处附近地形变化也越小,越容易被淹没.

4) 植被类型. 植被类型影响地表水与地下水之间相互关系. 不同的植被类型对降雨截留、蓄水能力不同,同时也影响降雨汇流的时间和大小.

5) 降雨强度. 降雨量和降雨强度是影响洪水的直接因素,决定了洪水量级的大小^[9]. 年均降雨量越大,说明该地区降雨强度大,冲刷力强且激发力大. 西区沟小流域内的年降雨量分为 600 ~ 700 mm 和大于 700 mm 两个级别^[10].

6) 岩土类型. 不同的岩土类型,其降雨入渗程度不同,抗冲刷能力亦不同. 松散土体则易形成冲蚀,抗冲刷能力差的岩土类型易造成水土流失,从而形成水毁灾害;对于入渗率低的坚硬岩体,则比较容易形成径流.

7) 坡度. 坡度会影响地表径流和地表渗透,平坦地区比有坡度的地区淹没速度要快,危险性更高.

3.2 评价系统的构建

为了便于处理量化数据,将划分后的等级作为分级赋值规则. 降雨强度仅有两个级别,其他 6 个评价指标为 5 个级别. 将每个指标的每个等级赋值 2 ~ 10 分,赋值越高,对应的山洪危险性也就越高,如表 3 所示. 获取评价指标的 ArcGIS 数据后,通过层次分析法确定西区沟山洪危险性评价指标权重,利用 ArcGIS 的栅格计算器将指标赋值及指标权重代入式(4) 计算山洪危险度. 其表达式为

$$F_d = \sum_{i=1}^n x_iw_i .$$

(4)

式中: F_d 为山洪危险度值; $x_i(i = 1, 2, \cdots, 8)$ 为山洪危险性指标的赋值; $w_i(i = 1, 2, \cdots, 8)$ 为山洪危险性指标的权重值.

表 3 层次分析法判断矩阵与各因子权重值
Table 3 Analytic hierarchy process judgment matrix and influencing factor weights

指标	降雨强度	高程	采空区	起伏度	植被类型	坡度	岩土类型	权重
降雨强度	1	2	3	3	5	7	9	0.350 7
高程	1/2	1	2	2	4	6	8	0.236 2
采空区	1/3	1/2	1	1	2	4	6	0.134 2
起伏度	1/3	1/2	1	1	2	4	6	0.134 2
植被类型	1/5	1/4	1/2	1/2	1	3	5	0.080 8
坡度	1/7	1/6	1/4	1/4	1/3	1	3	0.040 8
岩土类型	1/9	1/8	1/6	1/6	1/5	1/3	1	0.023 1

4 结果与讨论

4.1 山洪危险性评价结果

根据前人研究^[2,7-9],利用层次分析法将两两指标进行对比,构建判断矩阵获取各指标权重(表 3). 通过本文建立的指标系统,将各指标内各等级进行了赋值. 结合各评价指标的权重,根据式(4)利用 ArcGIS 软件计算获取山洪危险性综合分区图 4b,利用自然断点法将西区沟的山洪危险性分为 5 个级别:低度危险(5.22 ~ 6.43),轻度危险(6.43 ~ 7.43),中度危险(7.43 ~ 8.49),重度危险(8.49 ~ 9.21)和极度危险(9.21 ~ 10.0). 由表 4 和图 4b 中可知,极度和重度危险区集中在高程较低的沟底及其周边平坦地区,面积为 2.27 km²,占总流域面积的 28.47%. 4 个自然村均处在极度危险区,耕地、果园和部分森林地区为重度危险. 这些区域容易存水并造成山洪灾害,从而加重山洪的破坏性^[5,8]. 配合暴雨气象预报,西区沟内的居民应提前做好人员转移,有效地躲避灾害. 中度危险区面积为 2.98 km²,占总流域面积的

37.32%,主要分布在中高程地区. 轻度危险和低度危险区主要集中在中高程以上和坡度较陡地区,二者面积为2.73 km²,占总流域面积的 34.21%.

表 4 西区沟洪灾等级及致灾点数目
Table 4 Number of flood hazards and classes of Xiqu gully

等级	面积/km ²	百分比/%	灾害点	百分比/%
低度危险	0.66	8.31	0	0.0
轻度危险	2.07	25.90	1	2.5
中度危险	2.98	37.32	12	30.0
重度危险	1.55	19.39	14	35
极度危险	0.72	9.08	13	32.5

4.2 验证与讨论

通过现场调查,获取了 40 个发生山洪灾害破坏的地点,并将这些点投到西区沟危险性分区图 中进行验证. 山洪主要破坏路基、部分房屋和坝阶地,并且在地表或边坡坡面上留下水痕. 在西区沟中上游,由于“7.21”暴雨,人工堆砌排水渠遭到严重破坏. 通过对比验证发现,极度和重度危险区内的基础设施或者耕地果园遭到破坏的致灾数有

27 个,占现场调查致灾点总数的 67.5%。中度危险区的灾害点有 12 个,占总数的 30%,从图 4b 可知,采空高危险区主要分布在流域的上游段,现场调查中发现有 4 处破坏点,为山洪对山坡坡角的侧蚀破坏。图 4a 为未考虑采空危险分区这一评价指标的危险性分区结果,图 4b 为考虑全部 7 个评价指标的分区结果。通过对比发现,在靠近上游

地区的中高海拔地区(图 4 中虚线框内),普遍坡度较陡,图 4a 中大部分地区为中度危险。事实上,这些地区正是采空危险区较为严重的地区,根据前文分析,采空危险区对洪水具有抑制作用,通过图 4b 发现,如果考虑到采空塌陷区这一指标,虚线框内区域多为轻度危险,结合现场调查,该区域为轻度危险更合理。

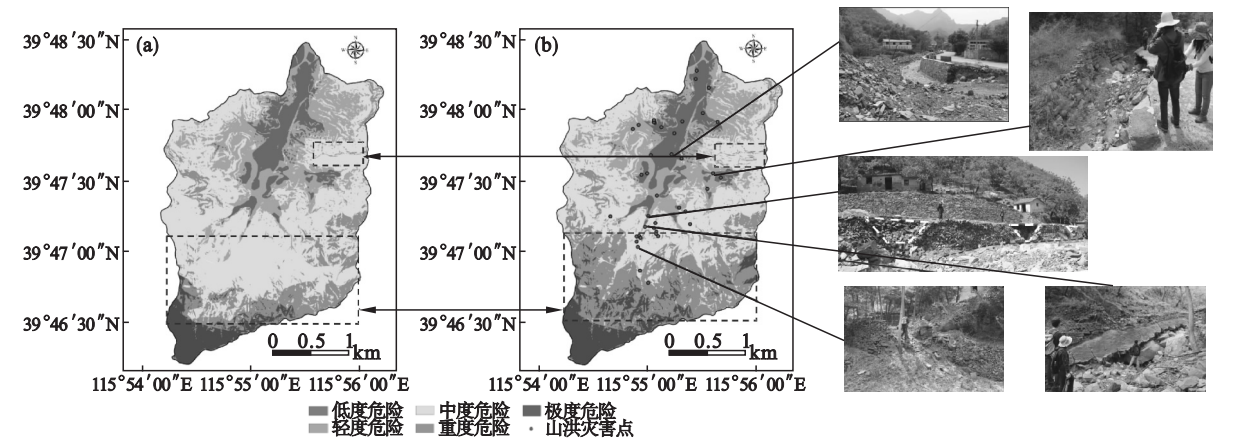


图 4 山洪危险性分区图及现场验证
Fig. 4 Flash flood susceptibility maps and field survey validation
(a)—未考虑采空危险区;(b)—考虑采空危险区。

5 结 论

- 1) 由于西区沟内的废弃煤矿,该地区煤矸石大量堆积。地下采空塌陷、地裂缝较为发育,从一定程度上对西区沟的山洪危险性造成了影响。
- 2) 本文提出了一种对山洪灾害危险性评价的指标体系,该体系重点突出了降雨强度、高程和采空危险分区三个指标在西区沟小流域山洪灾害危险性评价的主导地位。并结合层次分析法和 ArcGIS 绘制了西区沟的山洪危险性分区图。
- 3) 将未考虑采空区指标与考虑采空区指标的危险性分区结果对比,发现采空区对洪水的确具有抑制作用。结合野外考察,考虑采空区的危险性分区结果更贴近现场调查的实际情况。
- 4) 针对西区沟的地区特点,基于指标体系和层次分析法建立的评价模型能够很好地应用到西区沟的山洪评价中,评价方法合理有效,具有较好的适用性。

参考文献:

[1] Haq M, Akhtar M, Muhammad S, et al. Techniques of remote sensing and GIS for flood monitoring and damage assessment;a case study of Sindh province[J]. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2012, 15: 135 – 141.

[2] Pradhan B, Hagemann U, Shafapour T M, et al. An easy to

use ArcMap based texture analysis program for extraction of flooded areas from TerraSAR-X satellite image [J]. *Computer and Geosciences*, 2014, 63: 34 – 43.

[3] 朱静. 城市山洪灾害风险评价——以云南省文山市城为例[J]. *地理研究*, 2010, 29(1): 655 – 664.

(Zhu Jing. Urban flash-flood risk assessment: a case study in Wenshan City, Yunnan [J]. *Geographical Research*, 2010, 29(1): 655 – 664.)

[4] 莫健. 地质灾害危险性评价研究综述[J]. *西部探矿工程*, 2005, 114(10): 220 – 223.

(Mo Jian. Research on risk assessment of geological disasters [J]. *West-China Exploration Engineering*, 2005, 114(10): 220 – 223.)

[5] Saaty T L. The analytic hierarchy process: planning, priority setting resource allocation [M]. New York: McGraw-Hill, 1980.

[6] Oikonomidis D, Dimogianni S, Kazakis N, et al. A GIS/remote sensing based methodology for groundwater potentiality assessment in Tirnavos area, Greece [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 525: 197 – 208.

[7] Nerantzis K, Ioannis K, Thomas P. Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and analytical hierarchy process: application in Rhodope Evros Region, Greece [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 538: 555 – 563.

[8] Pourghasemi H R, Jirandeh A G, Pradhan B, et al. Landslide susceptibility mapping using support vector machine and GIS at the Golestan Province, Iran [J]. *Journal of Earth System Sciences*, 2013, 122(2): 349 – 369.

[9] Bonacci O, Ljubenkov I, Roje-Bonacci T. Karst flash floods: an example from the Dinaric karst (Croatia) [J]. *Nature Hazards Earth System Sciences*, 2006, 6(2): 195 – 203.

[10] 张长敏. 煤矿采空塌陷特征与危险性预测研究: 以北京西山地区为例 [D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2009.

(Zhang Chang-min. Subsidence features and risk prediction in coalmine goafs: a case study of the Xishan area in Beijing [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2009.)