

基于层次分析和信息量法的地裂缝危险性评价

王兵虎, 马学军, 邵长庆, 宋 伟, 吕凤兰

(中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071000)

摘要:华北平原是遭受地裂缝较严重的地区,尤其是对于重大的线性工程,地裂缝的影响更为敏感。对于山前平原地带,地裂缝的形成是多要素成因的综合结果。利用 ArcGIS 平台,选择活动构造、地貌岩性和地下水位、第四系厚度、地裂缝现状分布五大类影响因子,采用层次分析—信息量模型对京石高铁和南水北调京石段进行了地裂缝危险性评价,结果表明这种方法能够较为合理的评价地裂缝危险性,并且对类似区域的危险性评价具有借鉴意义。

关键词:地裂缝;危险性评价;层次分析;信息量法;ArcGIS

中图分类号:P642.22 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)10-0091-06

Risk Assessment of Ground Fissures Based on AHP and Information Method/WANG Bing-hu, MA Xue-Jun, SHAO Chang-qing, SONG Wei, LÜ Feng-lan (Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Baoding Hebei 071000, China)

Abstract: The North China Plain is an area suffering from serious ground fissures, to which major linear projects are most sensitive. Multiple factors contribute to the formation of ground fissures in piedmont plains. Based on the ArcGIS platform, five main influence factors—active tectonic, geomorphic lithology, underground water level, thickness of the quaternary, and present situation of ground fissure distribution, are selected to conduct the ground fissure risk assessment for Jing-Shi High-speed Rail and the Jing-Shi section along the South-to-North Water Transfer Line with the AHP—information model. The results show that this method can provide proper fissure risk assessment, and be applicable in similar cases.

Key words: ground fissure; risk assessment; AHP; information method; ArcGIS

0 引言

华北平原地裂缝最早于 1963 年 3 月在邯郸市发生。1966 年邢台地震和 1976 年唐山地震后,华北平原地裂缝迅猛发展。20 世纪 90 年代以来,其活动明显增强。1989 年已波及 39 个县(市)共出现地裂缝 228 条。1993 年扩大到 402 条,扩及 49 个县(市),地裂缝也有增长的趋势,其中大于 1000 m 的发展到 13 条。1995—1996 年河北平原已达 449 条,地裂缝活动有增长趋势^[1]。

根据调查,华北平原的河北平原、北京市、天津市、山东鲁北平原、河南豫北平原等平原区共发现地裂缝 921 条(处),分布在 86 个县(市),造成建筑物和道路破坏,农田开裂漏水,给农业生产,工程设施和人民生命财产安全造成直接危害,经济损失十分严重,成为华北平原的地质灾害之一^[2-3]。重大工程沿线由于其工程特点,地裂缝的影响更为敏感,因此对其开展地裂缝危险性评价尤其重要。

地质灾害的危险性评价方法众多,有层次分析法、模糊聚类数学分析法、灰色聚类法、信息量法和

神经网络法^[4]。本次采用层次分析—信息量模型对京石高铁、南水北调京石段进行了地裂缝危险性评价。层次分析法^[5]对多因素成因的地质灾害体,具有定性半定量的决策优势,能够防止给定的权重值偏差太大。采用层次分析法通过专家打分确定每一评价因子的权重时,由于未能直接和现状结合,又具有一定的主观性因素。

信息量法^[6]是一种基于条件概率统计的评价方法,主要根据样本值在现实中存在的占比来估计单要素的信息量,反映一定的客观性。将两种方法进行结合,利用层次分析法确定各评价要素信息量的权重,然后按权重叠加后取得各个评价因子的总信息量,充分考虑了各评价要素的权重和信息量,避免了层次分析方法主观给定各因素权重的不足^[7],从而更较为合理地对地裂缝危险性进行评价。

1 研究区概况

1.1 重大工程沿线附近地裂缝的分布现状

华北平原地裂缝的分布特点是:山前冲洪积倾

收稿日期:2018-07-18

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“京津冀地区地面沉降地裂缝调查及地质环境监测(水环中心)”(编号:DD20160236)

作者简介:王兵虎,男,汉族,1970 年生,高级工程师,土工地质专业,主要从事水工环调查方面的工作,河北省保定市七一中路 1305 号,1197643773@qq.com。

斜平原区内地裂缝分布最为密集,且以近十年新出现的地裂缝居多,向东至冲积平原区地裂缝数量大幅度减少。京石高铁及南水北调沿线地裂缝的分布特征基本与大区域的地裂缝特点吻合。

这一区域地裂缝一般集中在山区与平原的交接地带,地势相对低洼及地势相对低缓区。主要沿山前大断裂呈条带状分布,但在局部又呈现聚集性。地裂缝类型上有不规则塌陷坑形及直线形和交叉性地裂缝、

弧形地裂缝等类型。不规则塌陷坑形最多,集中分布于太行山山前冲洪积扇倾斜平原区内,直线形地裂缝数量次之,分布相对较分散^[2]。京石高铁、南水北调线路重大工程沿线,对地裂缝位错敏感,经调查,京石高铁及南水北调中线京石段(房山—正定),在沿线 2 km 范围内各有 11 处地裂缝(表 1),目前对工程未产生直接影响。工程沿线区域分布的地裂缝参见图 1。

1.2 地质背景

表 1 京石高铁及南水北调工程沿线 2 km 范围内地裂缝分布

序号	点号	位 置	点性	长度/m	成因类型	距离/m	距离对象
1	NS014	涑水县娄村乡安阳村砖厂	塌陷坑	3.0	地下水潜蚀	392.53	南水北调
2	NS016	涑水县娄村乡安阳村	地裂缝	500.0	地下水潜蚀	363.36	南水北调
3	NS017	涑水县娄村乡安阳村	塌陷坑	0.1	地下水潜蚀	166.26	南水北调
4	NS057	易县裴山乡壮街村	塌陷坑	2.0	节理微破裂开启	1296.32	南水北调
5	NS063	易县塘湖乡吕村	塌陷坑	0.5	节理微破裂开启	965.63	南水北调
6	NS074	徐水区大王店乡小黑村	地裂缝	30.0	节理微破裂开启	1744.53	南水北调
7	NS075	徐水区大王店乡小黑村	地裂缝	20.0	节理微破裂开启	1806.31	南水北调
8	NS085	徐水区义联乡白莲峪村	塌陷坑	7.0	节理微破裂开启	120.78	南水北调
9	NS086	徐水区义联乡白莲峪村	地裂缝	20.0	节理微破裂开启	574.82	南水北调
10	NS138	新乐市木村乡中同村	塌陷坑	0.5	节理微破裂开启	276.68	南水北调
11	NS139	新乐市木村乡中同村	塌陷坑		节理微破裂开启	101.22	南水北调
12	GT013	涿州市码头镇浮洛营村东	地裂缝	35.0	节理微破裂开启	86.46	京石高铁
13	GT014	涿州市码头镇浮洛营村内	地裂缝	30.0	节理微破裂开启	360.44	京石高铁
14	GT016	涿州市刁窝乡台子村东	地裂缝	14.0	节理微破裂开启	725.35	京石高铁
15	GT019	涿州市码头镇涿全村南	无痕迹		节理微破裂开启	1440.15	京石高铁
16	GT023	涿州市刁窝乡台子村东	地裂缝	1000.0	节理微破裂开启	770.50	京石高铁
17	GT040	涿州市高官屯乡旧田官屯村南	塌陷坑	4.3	节理微破裂开启	2136.33	京石高铁
18	GT041	涿州市高官屯乡老小庄村南	塌陷坑	2.8	节理微破裂开启	1192.82	京石高铁
19	GT045	涿州市高官屯乡老小庄村西	塌陷坑	21.0	节理微破裂开启	70.72	京石高铁
20	GT049	高碑店市方官庄乡赵辛庄村西	塌陷坑	1.6	节理微破裂开启	1129.16	京石高铁
21	GT052	高碑店市方官庄乡狮后街村中	地裂缝	17.2	节理微破裂开启	750.02	京石高铁
22	GT056	定兴县天官寺乡阎家营村中	地裂缝	13.0	节理微破裂开启	955.28	京石高铁

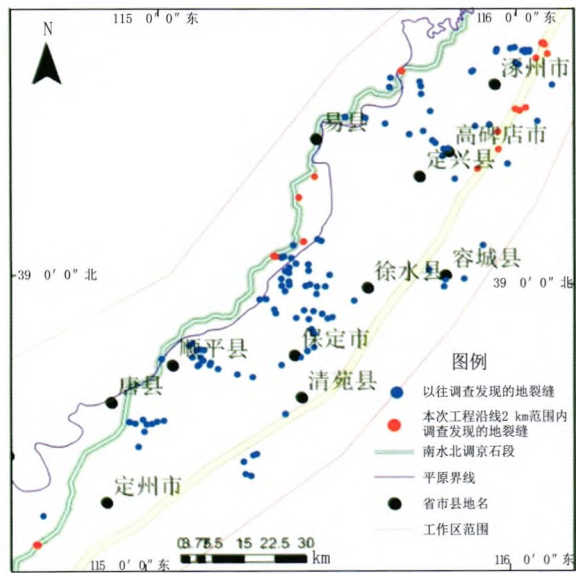


图 1 工程沿线及附近区域地裂缝分布图

京石高铁及南水北调线路重大工程沿线主要位于华北平原的山前地带,地貌成因类型主要为丘陵和山前平原地貌,平原区主要由冲洪积扇、冲洪积平原、泛滥平原和洼地组成。浅层地下水平原区地下水由潜水向层间水转变,侧向径流替代垂直渗流。随着地下水开发力度的增加,在 20 世纪 60 年代以来随着采补失衡状况日趋严重逐渐形成时至今日的地下水漏斗区。

华北平原地裂缝成因复杂、主控因素众多,太行山前倾斜平原对于山前平原地带,地裂缝以非构造地裂缝灾害为主。研究区分布有 153 处地裂缝,其中有 22 处裂缝分布在工程沿线 2 km 范围内,成因类型主要为土层节理微破裂开启型。地裂缝的形成是多要素成因的综合结果,活动构造、地形地貌、岩性及地层结构、地表水、地下水对地层侵蚀、潜蚀是

山前地带地裂缝形成的主要因素^[1-8]。

2 评价实现过程

首先取得各个评价因子的信息量,然后利用层次分析法确定各评价因子信息量的权重,在按权重叠加后取得总信息量,然后根据总信息量的分布,进行地裂缝危险性分区。

2.1 评价因子的选择

山前平原地裂缝,规模小,塌陷坑居多,具有非构造地缝的一般特征,综合考虑地裂缝的发育规模、形态特征和形成机理,危险性评价因子的选择主要从以下几方面考虑。

2.1.1 活动性因子

按照影响距离划分:(1)活动断层沿线 1 km 范围内;(2)活动断层沿线 1~5 km 范围内;(3)活动断层沿线 5~10 km 地区。

按照活动速率的差异性划分:以华北地区最大剪应变率为指标,最大剪应变的大小反映了地壳构造不稳定的程度,其值越大构造的活动性就越强^[9]。分为 3 个级别:(1)最大剪应变速率大于 $2 \times 10^{-8}/a$;(2)最大剪应变速率 $(1 \sim 2) \times 10^{-8}/a$ 范围内;(3)最大剪应变速率 $(0 \sim 1) \times 10^{-8}/a$ 范围内。

2.1.2 地形地貌因子

按照第四系地貌成因类型划分:(1)黄土状土冲洪积扇;(2)河流区;(3)泛滥平原;(4)河间洼地区。

按照古河道分布区范围划分:分为古河道区和非古河道区两种。

2.1.3 地下水位因子

按照浅层地下水埋深:(1)水位埋深 > 30 m;(2)水位埋深 10.1~30 m;(3)水位埋深 0~10 m。以 2009 年 6 月华北平原浅层地下水水位埋深为对象。

按照地下水开采强度划分:以开采模数分为 3 类。以 2000—2010 年地下水开采强度图为研究对象。

按照地面沉降升降划分为 5 级:(1)小于 0.59×10^{-3} ;(2) $(0.59 \sim 1.67) \times 10^{-3}$;(3) $(1.67 \sim 3.83) \times 10^{-3}$;(4) $(3.83 \sim 7.55) \times 10^{-3}$;(5)大于 7.55×10^{-3} 。

2.1.4 第四系厚度因子

基底埋深越大产生差异变化的可能性越大,第四系厚度分为 3 类:(1)厚度 < 160 m;(2)厚度 160~280 m;(3)厚度 > 280 m。

2.1.5 地裂缝密集度因子

分为地裂缝现状密集区和地裂缝相对分散区。地裂缝经过密度分析栅格化后重分类产生。

2.2 评价方法

2.2.1 评价因子权重的确定

层次分析法是一种定性和定量相结合的层次化分析方法。可以以定量的形式反映地质环境因子及拟划分区段的权重,提示人们对某些因子的主观判断是否与思维过程一致,从而增强其科学性。

(1)建立层次分析结构模型。

总结地裂缝形成条件,建立层次分析结构模型(见图 2)。

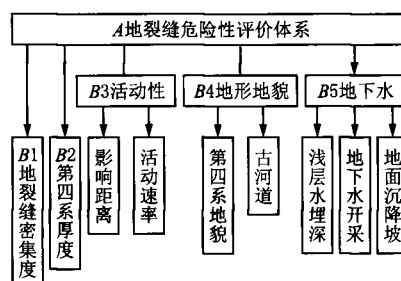


图 2 地裂缝危险性评价层次分析模型

(2)构造出各层次中两两比较的判断矩阵。

对条件层和方案层的影响因子,根据相对重要性依据经验知识进行两两比较,给出定性判断矩阵,相对重要性标度采用 1、3、5、7、9 标度分别表示重要性相同、较重要、明显重要、强烈重要、极端重要。构造的条件层和方案层的判断矩阵具有如下特征。

A	B1	B2	B3	B4	B5	B3	B31	B32
B1	1	7	3	5	3	B31	1	3
B2	1/7	1	1/3	1/3	1/3	B32	1/3	1
B3	1/3	3	1	3	3			
B4	1/5	3	1/3	1	1			
B5	1/3	3	1/3	1	1			

B4	B41	B42	B5	B51	B52	B53
B41	1	1/3	B51	1	1/3	1/5
B42	3	1	B52	3	1	1/3
			B53	5	3	1

(3)单排序及一致性检验。

计算判断矩阵的近似特征向量和最大特征值: A 层和 B5 层特征值和特征向量用 matlab 计算, B3 层和 B4 层特征向量,直接赋值。

A~B 层特征值和特征向量: $\lambda_{\max} = 5.1824$, 特征向量 = (0.8509, 0.0945, 0.4281, 0.1937, 0.2150)。

B5 层特征值和特征向量: $\lambda_{\max}=3.038$,特征向量 $= (0.1506, 0.3714, 0.9162)$ 。

B3 层特征向量赋值为 $(0.75, 0.25)$,B4 层特征向量 $(0.25, 0.75)$ 。

一致性检验判断:当 $CR \leq 0.1$ 时认为判断矩阵具有一致性,判断是一致的,可以接受,否则,进行判断矩阵调整使其达到一致性。计算表明,特征向量满足一致性检验。

$(B1, B2, B31, B32, B41, B42, B51, B52, B53)$ 为 $(0.8509, 0.0945, 0.32, 0.11, 0.05, 0.15, 0.02, 0.06, 0.14)$ 。归一化后为 $(0.47, 0.05, 0.18, 0.06, 0.03, 0.08, 0.01, 0.03, 0.08)$,此为 9 个要素的权重向量。层次分析表明地裂缝危险性评价因子的权重排序依次为地裂缝密集度、活动断层影响距离、古河道、地面沉降坡降、断层活动速率(最大剪切应变速率)。

2.2.2 信息量法基本原理

信息量法主要根据信息量来评价各影响因子与研究对象间的相关性,具有一定的客观性,信息量越大,地裂缝发生的可能性越大。

信息量可以用公式: $I(X1, X2, X3, \dots, Xn) = \ln[P(y, x1, x2, x3, \dots, xn)/P(y)]$ 表示为地裂缝多种要素组合条件下的地裂缝发生的概率,在这里选用第四系厚度、活动构造影响距离、地壳最大剪应变速率、第四系地貌、古河道、浅层地下水埋深、地下水开采强度、地面沉降坡度为研究对象; $P(y)$ 是地裂缝发生的概率。地裂缝以栅格单元的划分为基础,采用简化的单因子信息量模型计算,再进行叠加。

单因子信息量的计算公式为:

$$I(X1)=\ln \frac{Ni/Si}{N/S}$$

式中: Ni/Si ——评价因子子类栅格单元的地质灾害点的平均密度; N/S ——研究区的总的地裂缝的点平均密度。

2.2.3 ArcGIS 实现计算信息量的过程

信息量法的叠加是基于 ArcGIS 信息量法的实现。利用 ArcGIS 实现信息量法的应用已经成为地质灾害危险性评价的普遍方法^[11-13],实现过程如下:首先需要对矢量文件根据各要素的指标建立属性库。然后进行要素的栅格化,栅格划分采用 1000 m×1000 m 作为评价单元,共划分 8980 个单元。在栅格化后,再按照要素的指标分级进行重分类,统计汇总,然后可以得到 Si/S ;在地裂缝现状图进行相同大小的栅格化后,裂缝单元栅格进行赋值为 1,此栅格文件作为逻辑乘因子与各要素的栅格文件进行栅格乘

法运算,统计汇总,可得到 Ni/N ,代入单因子信息量的计算公式,可计算出单因子的信息量值^[14-15]。

2.2.4 信息量计算结果说明

单因子信息量的计算结果显示,在 28 种参加计算的评价要素中,信息量的最大值为 1.46777,最小值为-2.35735。浅层水埋深和地下水开采、地壳最大剪应变速率、地面沉降区坡降、第四系厚度、地貌类型、浅层水埋深以及活动断层影响距离,位于信息量排序的前 9 位(见表 2)。

表 2 评价各要素信息量值

评价因子	分级	信息量计算			排序
		Ni/N	Si/S	信息量值	
第四系厚度	<160 m	0.266667	0.242762	0.093919149	15
	160~280 m	0.571429	0.318485	0.584564863	5
	>280 m	0.161905	0.438753	-0.996926869	26
影响距离	<1 km	0.173469	0.126930	0.312363156	9
	1~5 km	0.500000	0.441044	0.125463455	14
	5~10 km	0.346939	0.432026	-0.219336800	22
最大剪应变速率	<1×10 ⁻⁸ a	0.133929	0.164978	-0.208502323	21
	(1~2)×10 ⁻⁸ a	0.375000	0.189972	0.680049333	3
	>2×10 ⁻⁸ a	0.580357	0.645051	-0.105685952	14
地形地貌成因	冲洪积扇	0.232143	0.145895	0.464466376	6
	洼地	0.125000	0.109634	0.131166192	13
	河流	0.142857	0.201510	-0.343994878	23
古河道	泛滥平原	0.500000	0.542960	-0.082427554	19
	古河道	0.688073	0.676606	0.016805813	16
	非古河道	0.311927	0.323394	-0.036102208	17
浅层水埋深	0~10 m	0.051724	0.603820	-2.457354250	28
	10~20 m	0.336207	0.558218	-0.507022525	24
	20~30 m	0.456896	0.318590	0.360550784	8
	30~40 m	0.060345	0.040959	0.387506528	7
地下水开采模数/[m ³ ·(a·km ²) ⁻¹]	40~55 m	0.094828	0.021852	1.467772274	1
	<30×10 ⁴	0.866071	0.928748	-0.069870551	18
	(30~100)×10 ⁴	0.062500	0.053467	0.156101916	12
地面沉降坡降	>150×10 ⁴	0.071429	0.017785	1.390348544	2
	<0.59×10 ⁻³	0.187500	0.370759	-0.681773410	25
	(0.59~1.67)×10 ⁻³	0.500000	0.412017	0.193543488	10
	(1.67~3.83)×10 ⁻³	0.178571	0.148800	0.182383159	11
	(3.83~7.55)×10 ⁻³	0.107143	0.054334	0.679014209	4
	>7.55×10 ⁻³	0.026786	0.140910	-1.660242026	27

可见地下水埋深在 20~55 m,地下水开采模数在大于 150×10⁴,最大剪切应变速率(1~2)×10⁻⁸/a,地面沉降坡降在(3.83~7.55)×10⁻³,第四系厚度在 160~280 m,地貌类型为黄土土冲洪积扇,活动断层 1 km 以内,非构造地裂缝的发生概率较大。

3 危险性分区

3.1 评价模型的建立

对各要素栅格重分类,整数化赋值,采用栅格计算器叠加,总信息量=第四系厚度 $\times 0.05$ +影响距离 $\times 0.18$ +剪切应变活动速率 $\times 0.06$ +地形地貌 $\times 0.03$ +古河道 $\times 0.08$ +浅层水埋深 $\times 0.01$ +地下水开采 $\times 0.03$ +地面沉降坡降 $\times 0.08$ 。

然后再对信息量符号化操作,采用自然间断点法分 3 类,得出高中低 3 个级别的易发性分区(图 3)。

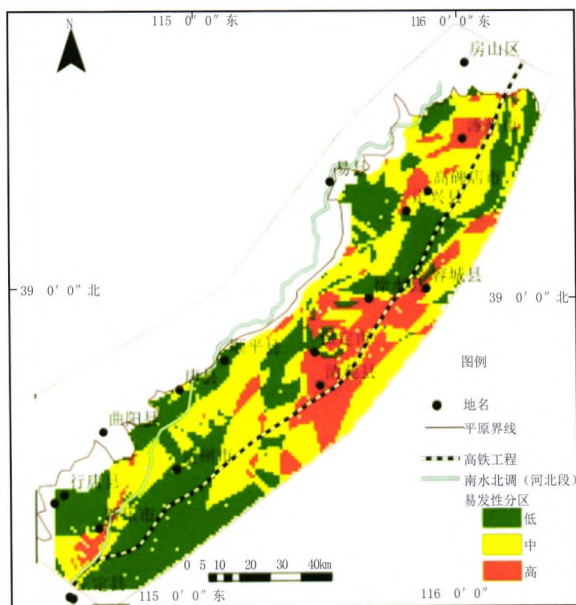


图 3 地裂缝易发性分区图

从易发性分区地裂缝的分布(图 4)可见,地裂缝主要位于中—高易发区域,所占比例约 75%,说明信息量模型基本反映了地裂缝产生的生成条件。

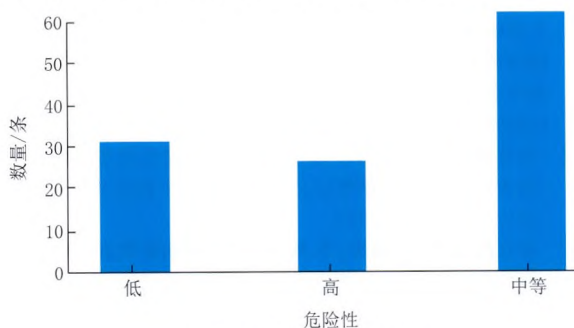


图 4 易发性分区地裂缝分布图

3.2 易发性分区

地裂缝高易发性分区占研究区面积的 18.5%,主要分布在保定市以东,徐水县以南,清苑县以北,以及涿州、新乐、高碑店、定兴的局部地带。地裂缝中易发性分区占研究区面积的 41.0%,分布在高易发区周边。地裂缝低易发性分区占研究区面积的 40.5%,分布在定州以南、定兴至徐水之间、易县以

东以及顺平—行唐的山前地带。

3.3 危险性分区

由于地裂缝形成机理认识的局限性,地裂缝密集度作为危险性评价的因子参与危险性分区的评价,根据层次分析法的结果,其权重占比 0.47,与易发性分区叠加,同样也分成 3 个级别的安全性分区(图 5)。分区表明,地裂缝危险性高区占研究区面积的 9%,地裂缝危险性中区占 7.2%,地裂缝危险性低区占 83.8%。

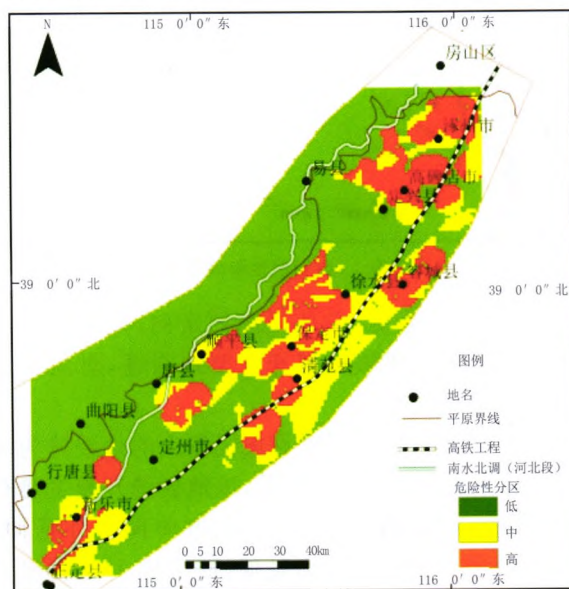


图 5 地裂缝危险性分区图

3.4 京石高铁、南水北调沿线分区

3.4.1 分区结果

用线路工程做 1 km 缓冲区裁剪,结果得到线状工程沿线地裂缝危险性分区图(图 6)。京石保定—石家庄段高铁地裂缝危险性高区占评价线路的 26.1%,危险性中区占 25.2%,危险性低区占 48.7%。南水北调保定—石家庄段危险性高区占评价线路的 14.5%,危险性中区占 5.6%,危险性低区占 79.8%。

3.4.2 沿线地裂缝分析评价

京石高铁沿线途径的涿州市、高碑店市及定兴县地裂缝多以片状塌陷坑形式出现,除涿州市刁窝村分布地裂缝规模较大外其余规模均较小。浮洛营村地裂缝分布区域距离京石高铁线路较近,其中浮洛营村东地裂缝最近处仅 100 余米,对线路有潜在威胁,塌陷坑一经发现应及时填埋夯实。

刁窝二村地裂缝最早出现于 2008 年雨季,之后每年均有不同程度的出现。多发育于杨树林及果树林内,地裂缝多以塌陷坑、陷穴和串珠状洞穴出现,

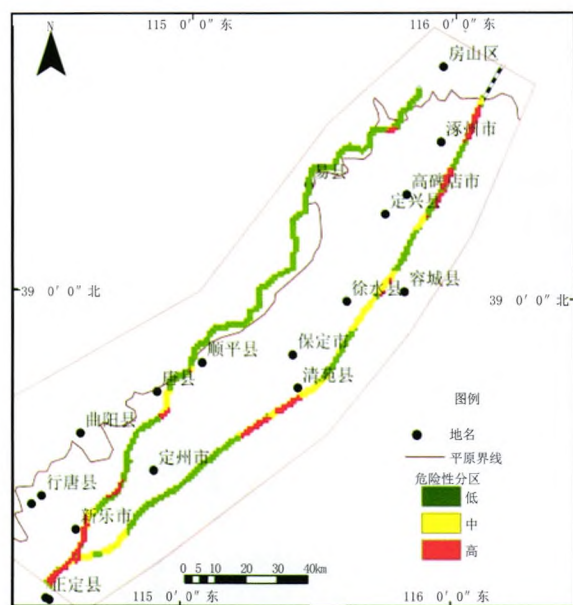


图6 工程沿线1 km范围地裂缝危险性分区图

地面塌陷坑10余处,总体呈东西走向,最大直径达3.0 m。属于节理微破裂开启型地裂缝,对南水北调威胁较小。

南水北调京石段现可见规模较大的地裂缝为涞水县安阳村地裂缝,总体来看,该地裂缝开裂主要有两组方向。一组沿70°的北东东方向向村外延伸,另一组为150°方向向村内延伸,此方向主要表现为墙体的开裂和倒塌,方向与南水北调线路斜交。该地裂缝规模较大,对线路有潜在威胁。目前除了小树林塌陷坑可见外,地表其他地点塌陷坑已经填埋不可见。地裂缝成因类型属于地下水潜蚀型,可采取地质灾害监测、防渗、填埋夯实等防治对策综合处置^[16]。

新乐市木村乡中同村2处地裂缝距离南水北调沿线较近,一处位于南水北调东侧约150 m,种地浇水时有出现。另一处位于南水北调东侧约50 m的树林中,以塌陷坑形式出现,地裂缝成因类型属于节理微破裂开启型,对南水北调威胁较小,运行期间注意巡查。

4 结论

(1)华北平原地裂缝成因复杂,地裂缝的形成是多要素成因的综合结果,本次评价采用活动构造、地貌岩性和地下水位、第四系厚度影响因子,采用层次分析—信息量模型对京石高铁、南水北调京石段进行了地裂缝易发性评价,结果表明这种方法能够较为合理地反映地裂缝的易发性,符合度相对较高。

在地裂缝危险性评价中,采用层次分析方法获取的地裂缝的密集度权重,与易发性结果的信息量进行了叠加分析,得到危险性评价分区,分区既反映地质灾害客观现实,又反映了地裂缝产生的地质条件。

(2)单因子信息量的计算结果显示,地下水埋深在20~55 m,地下水开采模数 $>150 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$,最大剪切应变速率 $(1 \sim 2) \times 10^{-8} \text{ a}$,地面沉降坡降在 $(3.83 \sim 7.55) \times 10^{-3}$,第四系厚度在160~280 m,地貌类型为黄土状土冲洪积扇,活动断层1 km以内,非构造地裂缝的发生概率较大。

(3)应用层次分析法需要在地质灾害充分详细调查研究的基础上进行评价要素的选择与权重分析,信息量法与层次分析的结合能够对重大沿线工程的防灾减灾提供基础资料,并且对类似区域的风险性评价具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 李昌存.河北平原地裂缝研究[D].湖北武汉:中国地质大学(武汉),2002:14—19.
- [2] 杨旭东,等.华北地裂缝调查与防治研究[R].河北保定:中国地质调查局水文地质环境地质调查中心,2015:84—108.
- [3] 王景明,等.地裂缝及其灾害的理论分析与应用[M].陕西西安:陕西科学技术出版社,2000:8—10.
- [4] 薛凯喜,刘东燕,袁传鹏,等.基于模糊聚类的地质灾害损失程度评价数学模型研究[J].2010,(4):428—433.
- [5] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:高等教育出版社,2002:224—249.
- [6] 吴辉龙.关中盆地地裂缝灾害危险性区划[D].陕西西安:长安大学,2016:40—41.
- [7] 吴丽清,廖婧,等.基于AHP—信息量法的武汉地区岩溶地面塌陷危险性评价[J].长江科学院院报,2017,34(4).
- [8] 王景明,等.地裂缝及其灾害的理论分析与应用[M].陕西西安:陕西科学技术出版社,2000:385—388.
- [9] 党学会,郭炳辉,吕健.基于GPS的华北地区地壳水平形变特征研究[J].华北地震科学,2015,33(1):3—4.
- [10] 杜军,杨青华,严嘉,等.基于GIS与信息量模型的汶川次生地质灾害危险性评价[J].地球科学—中国地质大学学报,2010,35(2):324—330.
- [11] 高克昌,崔鹏,赵纯勇,等.基于地理信息系统和信息量模型的滑坡危险性评价[J].岩石力学与工程学报,2000,5(5):991—990.
- [12] 陶舒,胡德勇,赵文吉,等.基于信息量与逻辑回归模型的次生滑坡灾害敏感性评价——以汶川县北部为例[J].地理研究,2010,29(9):1594—1005.
- [13] 陈立华,叶江,魏传健,等.基于ArcGIS与信息量法的滑坡易发性评价[J].广西大学学报,2016,41(1).
- [14] 汤国安,杨昕. ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程(第2版)[M].北京:科学出版社,2012.
- [15] 李伟,等.涞水县娄村满族乡安阳村地面塌陷勘察报告[R].河北保定:中国地质调查局水文地质环境地质调查中心,2005:40—42.