

模糊评判法在公路黄土洞穴发育程度分区中的应用

孙 萍, 彭建兵, 陈立伟

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 阐述了影响黄土洞穴形成的黄土湿陷性、崩解性、地质构造、节理裂隙、微地形地貌和水文及气候条件等工程地质特性和地质因素;在公路沿线地区,公路工程质量及人类活动也是黄土洞穴形成的影响因素。洞穴发育程度分区预测和评价极具复杂性、随机性和模糊性,为此,在对各影响因素分析的基础上,借助模糊综合评判法,对黄土区公路沿线洞穴发育程度分区进行了研究。与实际情况对比分析表明,预测评价结果合理可靠,可作为黄土区已建公路洞穴灾害的防治依据。

关键词: 模糊评判;黄土洞穴;发育程度;分区;预测

中图分类号: P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2007)04-0393-07

Development Density Zoning of Highway Loess Caves by Fuzzy Evaluation Method

SUN Ping, PENG Jian-bing, CHEN Li-wei

(School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract Loess cave developed in the loess plateau is a kind of unfavorable geo-hazard, and it has become the main reason causing damage to the highway in western loess region. The formation of loess caves is not only relevant to the engineering characteristics of loess itself such as collapsibility, disintegrative etc, but to many other geologic factors such as geological structure, joint fissure, microtopography, hydrographic and climatic condition. Moreover, engineering quantities and human activities along highways are the influencing factors in loess area. Therefore the evaluation of development density zoning of loess caves is complex, random and fuzzy. Based on the distinct analysis of all the influencing factors, this paper studies the problem by fuzzy evaluation method. It is found that the evaluation result is reasonable and reliable by comparing with practical situation, so it can be applied to the prevention of cave hazards in loess area.

Key words: fuzzy evaluation; loess caves; development density; zoning; prediction

0 引言

中国西北地区是黄土分布的主要地区,也是世界上黄土最为发育的地区。黄土洞穴是黄土高原地区一类特殊的地质灾害,造成田地沉陷、隧道塌方、路基坍塌、路堤滑坡等,对人类生命财产安全构成了极大威胁。近年来,随着国家西部大开发和基础设施建设的加强,需要大力发展公路交通事业,

但广泛发育于黄土中的洞穴对公路建设和安全运营带来了一系列危害(图1~4),已成为公路损坏的主要原因^[1-4]。因此掌握黄土洞穴的分布规律,建立危害程度评价方法和预测预报体系,是对黄土地区拟建、在建和已建公路工程依据洞穴发育强弱进行重点养护的当务之急。

调查表明,影响控制黄土洞穴形成分布及发育程度的地质因素包括微地形地貌特征、黄土成因时

收稿日期: 2006-12-20

基金项目: 国家西部交通建设科技攻关项目(200131881213)

作者简介: 孙 萍(1978-),女,陕西合阳人,博士研究生,从事岩土工程与工程地质研究, E-mail: clw5070@163.com



图 1 阶地上发育的串珠状陷穴(定西郭沟)
Fig. 1 Beaded Concave Caves
on Terrace(Dingxi Guogou)



图 2 暗穴引起的路面凹陷(吴旗—志丹)
Fig. 2 Pothole Created by Loess Hidden
Hole(Wuqi—Zhidan Highway)



图 3 黄土洞穴引起的路面塌陷(环县)
Fig. 3 Pavement Collapse Created by
Loess Caves(Huan Xian County)

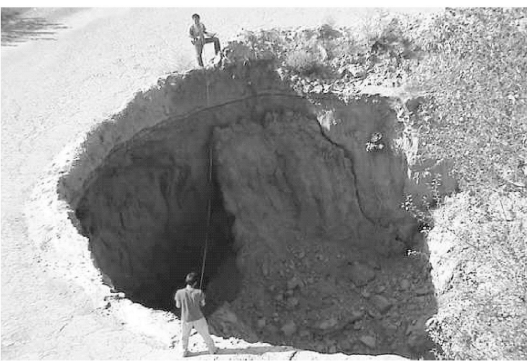


图 4 黄土洞穴引起的路面塌陷(庆阳—西安公路)
Fig. 4 Pavement Collapse Created by
Loess Caves(Qingyang—Xi'an Highway)

代及物理力学性质、坡形坡度、降雨、植被覆盖情况以及地形切割程度等。另外在公路沿线地区,公路工程质量及人类活动也是黄土洞穴形成的外部因素^[5]。对于黄土区公路沿线洞穴发育程度分区预测和评价将表现出极大的复杂性、随机性和模糊性。为此,对这类具有模糊性的工程问题,借助模糊数学方法则更具合理性^[6-7]。

1 洞穴发育程度分区及其影响因素

1.1 黄土洞穴空间分布规律

对陇西地区部分路段沿线及陇东、陕北地区主要公路沿线的黄土洞穴分布情况调查表明^[9],黄土洞穴的分布往往呈集中地成片分布,其原因主要是由于洞穴侵蚀的区域差异很大,地区性规律较差,反映出洞穴侵蚀影响因素的复杂多样性,尤其是新构造运动、大地形条件以及人为活动等非地带性因素的相互交叉影响,给黄土洞穴的分布规律研究带来了很大的困难。在此情况下,为

了反映整个黄土高原洞穴发育情况,运用平行对比法,在各调查区选取洞穴比较发育的典型区域或公路路段,对黄土洞穴密度进行统计分析,揭示其在空间分布的规律性。根据野外调研所统计的各地区黄土洞穴的发育密度,将黄土洞穴分布区按发育密度分为强发育区(I区)、较强发育区(II区)、中等发育区(III区)、较轻发育区(IV区)、轻度发育区(V区)、不发育区(VI区)6个等级、共39个区块(图5)。

1.2 黄土洞穴发育的地质条件及影响因素

1.2.1 地层与土性

在黄土高原地区,黄土洞穴主要发育在上更新统马兰黄土和全新统新近堆积黄土中,这两套地层厚度越大黄土洞穴越发育,发育深度也越大,而在中更新统及以前老地层中则较少发育。主要是由于老黄土的物理力学性质与新黄土有显著差异,实际上已不具有典型黄土的大孔隙、疏松、易崩解、强湿陷等特征,这些特征恰是黄土暗(陷)穴易于形成

的主要内在原因。陇西地区更新、全新统黄土厚度大, 最大可达 30 m 以上, 因而这一地区黄土洞穴也最发育; 陇东和陕北更新、全新统黄土厚度较陇西薄一些, 黄土洞穴发育密度明显偏小。黄土洞穴的分布在一定程度上又受湿陷性黄土厚度控制。湿陷性黄土厚度一般在 8~15 m, 因此发育在 20 m 以下深度的洞穴已经很少见到。

黄土洞穴区域发育规律表明, 黄土洞穴发育密度呈现由西北向东南逐渐降低之趋势, 这一区域特点和黄土颗粒组成、疏松程度、湿陷性及崩解性等的地域性分布规律在宏观上呈现出较好的一致性, 表明黄土洞穴的形成和分布与黄土的这些特性有着密切的联系。黄土洞穴发育的地区普遍为强湿陷性黄土区, 尤其是自重湿陷性黄土分布区的黄土洞穴发育程度明显高于其他地区(图 6)。由此可看出, 黄土的湿陷性尤其是自重湿陷性是产生黄土洞穴的主要内在因素之一^[8]。

1.2.2 地质构造与节理裂隙

地质构造影响黄土洞穴发育主要有 3 个方面:

(1)地质构造控制了黄土高原地区地壳的不均匀升降、黄土高原的区域地貌轮廓和黄土分布的厚度差异, 进而影响到黄土洞穴的区域发育规律。

(2)新构造活动差异性影响到黄土洞穴发育程度。陇东陕北地区新构造活动微弱, 而陇西地区却是现代构造活动强烈的地区之一, 多次发生的破坏性地震, 大大破坏了这一地区黄土地层的完整性, 不仅直接触发滑坡、崩塌等重力侵蚀现象的发生, 而且大大松动了黄土结构, 有利于黄土洞穴的形成, 因而陇西地区黄土洞穴远较陇东陕北发育。

(3)构造活动和地震活动在黄土层中形成十分发育的构造节理, 并使黄土中各种原生、次生隐伏节理开启。由于这些构造节理本身为弱抗侵蚀带, 便于水流沿其进行选择性地蚀; 另外, 构造节理本身就是物质搬运的良好通道, 它使水分携带黄土物

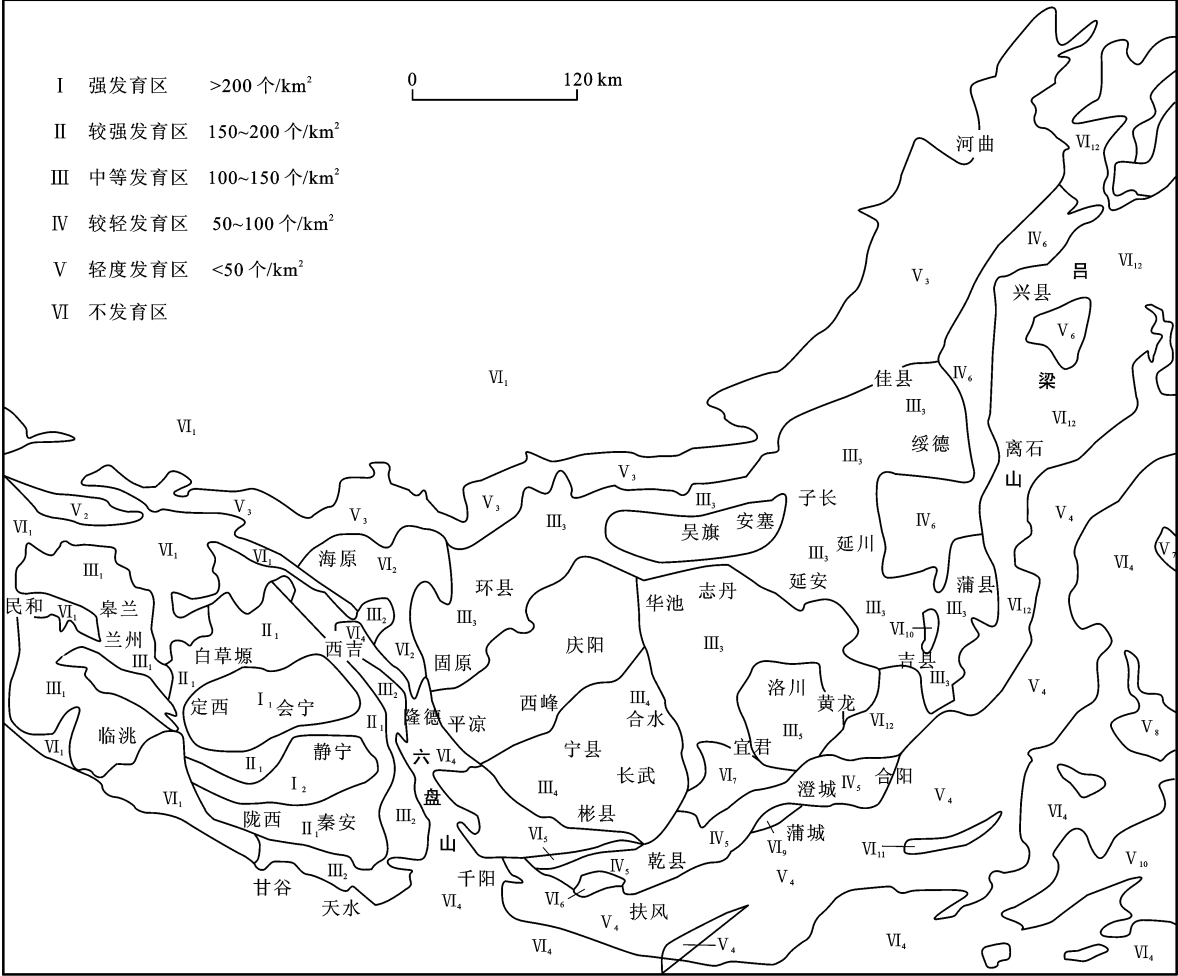


图 5 黄土高原地区黄土洞穴发育密度分区

Fig. 5 Development Density Zoning of Loess Caves in Loess Plateau

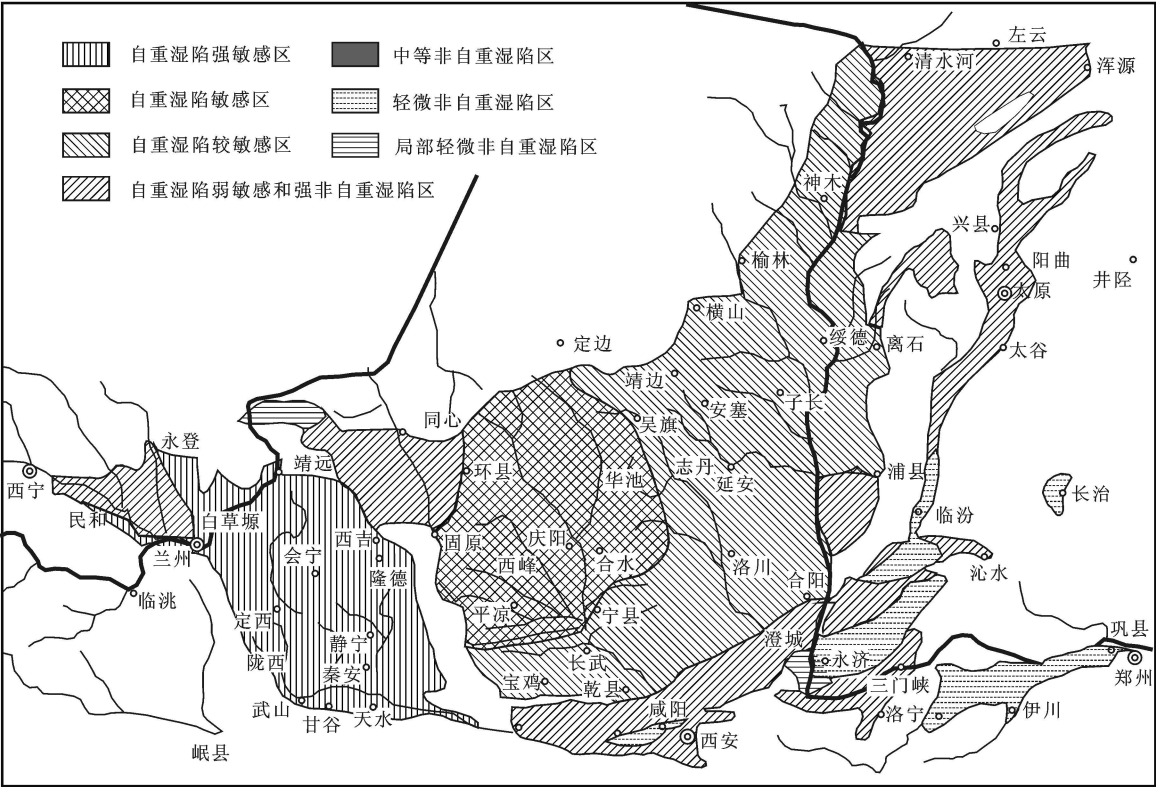


图 6 黄土高原黄土湿陷等级分区

Fig. 6 Loess Collapsibility Grade Zoning in Loess Plateau

质远距离大量搬运成为可能^[9-10]。野外调查发现,绝大多数延伸距离远、规模巨大的黄土暗穴都与黄土的构造节理有着十分密切的关系(图 7、8)。

除构造节理外,黄土地区还广泛发育有原生垂直节理、风化节理、湿陷节理和卸荷节理。这些节理裂隙同样对黄土洞穴的形成有极其重要的影响。地表节理裂隙若密集成带,易造成黄土结构疏松易受侵蚀,从而间接控制着黄土洞穴的成带性发育。大坡度地形条件下,地表水流对节理裂隙的强冲刷作用可造成黄土跌穴或水涮窝的形成,大规模构造

节理和大范围的湿陷节理还可在地表形成裂缝,串珠状的洞穴群常沿地裂缝带分布。

1. 2 3 微地形地貌

有利的地形地貌,如水流的汇集与排泄条件、黄土物质的搬运空间及堆积空间条件等,有助于黄土洞穴的发育。

在黄土塬、梁、峁上发育的黄土冲沟、凹型地(负地形)、凸型坡、滑坡体、崩塌堆积体、梯田等微地貌上,由于其上土层的厚度及土性、地形起伏状况、地层产状、汇水排水条件、地层中各种节理的



图 7 马兰黄土中发育的黄土洞穴(甘沟)

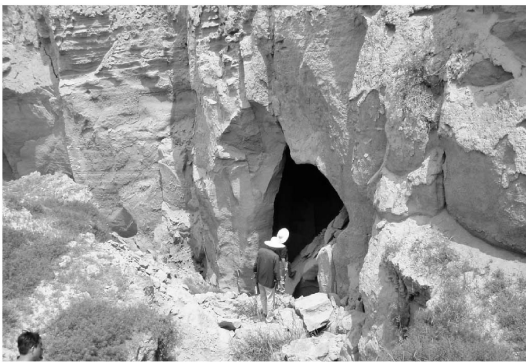


图 8 沿节理发育的黄土洞穴(庆阳)

Fig. 7 Caves Developed in Malan Loess(Gangou)

Fig. 8 Loess Caves Developed Along Joint(Qingyang)

种类和发育程度、生物作用的强弱等地层条件不同, 使得其上黄土洞穴的发育程度及种类也不尽相同(表 1)。野外调查结果也表明, 地貌单元主要为黄土残塬梁、黄土梁区、黄土梁峁区, 黄土暗(陷)穴普遍发育密度较高, 山间小型盆地中的冲

沟二级阶地上也常常较发育, 而大型河谷阶地特别是二级阶地以下的低级阶地或植被覆盖较好的黄土塬、黄土低台塬、黄土低阶浅谷区则很少发育或不发育。图 9、10 描述了不同微地貌条件下黄土洞穴的发育特征。

表 1 不同微地貌单元黄土洞穴的发育特征

Tab. 1 Loess Caves Developmental Characteristic on Different Morphogenetic Element			
微地貌区	黄土洞穴类型	规模及形态特征	平面分布特征
梁峁斜坡	陷穴、跌穴, 其中以陷穴为多	规模不大, 直径 2~3 m, 呈不规则的圆形、椭圆形	一般分布在梁峁斜坡上地形变化部位, 具有聚集性, 平直坡上较少, 只是零星分布
冲沟斜坡边缘、沟墙	陷穴、跌穴, 沟墙部分跌穴相对发育	规模不一, 大者直径 10~20 m, 深在 10 m 以上, 形态多样, 以圆形、椭圆形为主	黄土暗(陷)穴分布普遍, 一般距沟边 20 m 内发育程度较高
冲沟底部	跌穴、陷穴、暗穴均发育	规模不一, 跌穴主要发生在较陡的坡降处, 陷穴则一般沿暗穴通道呈串珠状分布	沿沟底呈线状分布, 深切沟一般比宽缓沟发育程度高
台地、阶地边缘、塬畔	陷穴与暗穴发育	陷穴、暗穴规模一般均较大, 发育密度高, 直径一般在几米到十几米, 深度与直径大体相当, 形态上多呈圆形、椭圆形, 陷穴多沿暗穴通道发生, 系暗穴不断向上扩展而成	平面上分布密集, 多在距沟边 100~150 m 内, 超过这一范围向里则少见

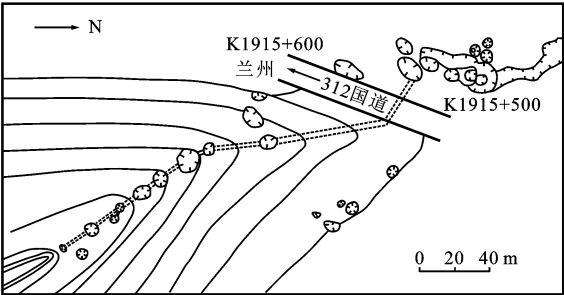


图 9 陷穴沿沟底及沟墙发育

Fig. 9 Sink Holes Developed Along Cleuch

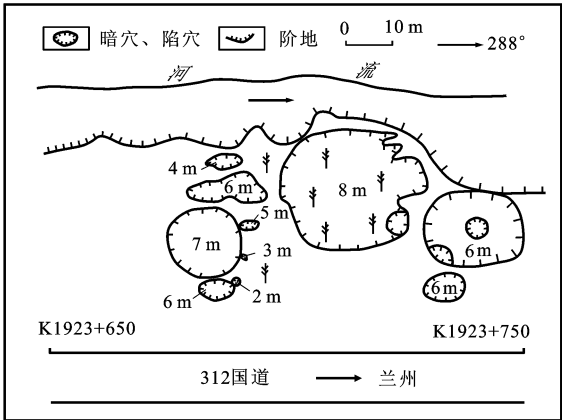


图 10 暗、陷穴发育在阶地边缘

Fig. 10 Caves Developed on the Edge of Terrace

1.2.4 水文地质及气候水文条件

影响黄土洞穴发育最重要的因素是水, 形成黄土洞穴的水源主要是大气降雨, 因此洞穴的形成与

地域性降雨、积水面积、水流下渗和冲刷有关。黄土高原的降雨量西北少而东南多, 而黄土洞穴的分布则呈西北多而东南少的趋势, 表面看降雨量大似乎与黄土洞穴的水蚀成因相矛盾, 其实不然, 由于相对黄土高原东南部来说, 西北部的黄土粉粒含量高、土质疏松, 黄土地层的垂直节理以及构造节理发育程度较高, 有利于黄土洞穴形成因素的综合贡献大于降雨量的贡献, 这就形成了西北部虽然降雨量少而洞穴却更发育的现象。黄土高原 7~9 月份是降雨相对集中的时期, 黄土洞穴也多在该期形成, 说明降雨尤其是季节性的集中降雨对黄土洞穴的形成起着主要作用。

除了以上因素外, 黄土洞穴的发育还与其所处的坡形坡度、地形切割程度、公路工程施工质量、人类及生物活动情况等因素相关。

1.3 洞穴发育程度模糊综合评价影响因素选取

就整个黄土分布区域来说, 研究将黄土洞穴的发育程度分为六个等级是从宏观上进行的, 且其量化标准是按照各地区洞穴发育密集区的发育频率经统计分析后划分的, 当对某一具体地区(小范围)进行预测评价时, 则应结合具体情况采用更为合理

的标准, 使得预测评价结果更符合局域上的洞穴发育情况。由于公路呈线状延伸, 跨越区域很大, 加上黄土区沟壑纵横, 微地形地貌十分发育, 故很难用一般方法给出黄土洞穴发育程度的定量分区。研究

主要以黄土洞穴发育的一般规律为指导,采用模糊综合评判法对黄土洞穴的分区进行预测。由于影响洞穴发育的因素众多,既有黄土自身特性,如大孔结构、粉粒、崩解性、抗冲蚀性、湿陷性和节理发育等内因,又有雨水、地层年代和地形地貌等外因,因此在预测过程中难以全面把握。实际工程应遵循重要性、独立性和易测性的原则,选取微地形地貌条件、土层的成因时代、坡形坡度及地形切割程

度指标作为预测因子。表 2 反映了各因素对暗穴形成的影响程度。

甘肃省陇西地区是黄土洞穴最发育的地区之一,该区在区域分区上属于强发育区,为了进一步探讨指定公路沿线黄土洞穴的发育情况,依据各影响因素的作用大小将其分为 4 个等级,即强发育区、较强发育区、中等发育区和弱发育区(表 2)。

表 2 影响因素等级

Tab. 2 Grade of Influencing Factors

影响因素	黄土区公路沿线洞穴发育分区			
	I (强发育区 v_1)	II (较强发育区 v_2)	III (中等发育区 v_3)	IV (弱发育区 v_4)
微地形地貌(u_1)	黄土沟壑残留台地、塬边、冲沟及阶地边(距河谷小于 150 m)	梁峁斜坡下部	梁峁斜坡中部	梁峁斜坡上部、塬内及阶地内(距河谷大于 150 m)
地层年代(u_2)	全新统、上更新统厚度大	全新统、上更新统厚度相对薄	上部为全新统或上更新统,下部为中更新统或更老地层	中更新统及更老地层
坡形坡度(u_3)	凹形坡、阶梯形坡	直线坡,坡度小于 10° 或塬面、阶地、台地	凸形坡、直线坡,坡度 $10^\circ \sim 30^\circ$	凸形坡、直线坡,坡度大于 30°
切割程度(u_4)	破碎	中等	较完整	不发育、地形完整

2 洞穴发育分区模糊综合评判

2.1 模糊综合评判步骤

2.1.1 建立模糊对象因素集 U 和评判集 V

根据所选定的 4 个影响因素和黄土区公路沿线洞穴发育的 4 个分区

$$U = \{u_1 \quad u_2 \quad \cdots \quad u_n\} (n = 4)$$
$$V = \{v_1 \quad v_2 \quad \cdots \quad v_m\} (m = 4)$$

2.1.2 构造隶属函数

工程上一般考虑的影响因素有定量指标和定性指标。由于所选定的黄土区公路沿线洞穴发育影响因素基本都是定性指标,则可按一定准则将其量化,建立多因素模糊评判的模糊矩阵。将影响因素分成 4 个等级:极有利(1)、有利(2)、一般(3)、不利(4),并按赋值标准给出评定值。为了反映公路各段属于某种发育程度分区的隶属度,采用梯形隶属函数,构造隶属函数方程式 $\mu(x)$ 为

$$\mu_{IV}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 1.25 \\ 3.5 - 2x & 1.25 < x \leq 1.75 \\ 0 & x > 1.75 \end{cases} \quad (1)$$
$$\mu_{III}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 1.25 \\ 2x - 2.5 & 1.25 < x \leq 1.75 \\ 1 & 1.75 < x < 2.25 \\ 5.5 - 2x & 2.25 < x \leq 2.75 \\ 0 & x > 2.75 \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_{II}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 2.25 \\ 2x - 4.5 & 2.25 < x \leq 2.75 \\ 1 & 2.75 < x < 3.25 \\ 7.5 - 2x & 3.25 < x \leq 3.75 \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_I(x) = \begin{cases} 0 & x < 3.75 \\ 0 & x < 3.25 \\ 2x - 6.5 & 3.25 < x \leq 3.75 \\ 1 & x > 3.25 \end{cases} \quad (4)$$

2.1.3 建立多因素模糊评判的模糊矩阵

为了掌握黄土洞穴在公路沿线的发育状况和分布规律,曾对陇西地区 312 国道沿线静宁一定西段的洞穴发育情况进行了分段研究,部分路段的地质条件特征及洞穴发育情况列于表 3。

基于野外详细调查情况及宏观认识,对各区段的影响因素分别按等级打分,而后有隶属关系可得多因素评判矩阵 R 。以 312 国道 K1914~K1916 为例,对各因素打分分别为 2、3、2、3,则由隶属函数可知相应模糊评判矩阵为

$$R = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

2.1.4 确定权重值

由于微地形地貌条件、土层的成因时代、坡形坡度及地形切割程度等因素对黄土洞穴的发育有

表 3 黄土洞穴发育程度统计

Tab. 3 Statistics of Loess Caves Development Density

统计区段	地形地貌条件	岩性时代	坡形坡度	沟壑切割程度	暗(陷)穴发育个数	频率 (个/km ²)	发育程 度分区
312 国道 K1914~K1916	梁峁斜坡中部	Q ₃	阶梯坡< 30°	中等	67	167	II
312 国道 K2030~K2032	黄土阶地	Q ₄	< 10°	中等	113	282	I
312 国道 K1970~K1972(路南)	黄土沟壑残留台地	Q ₃	< 10°	破碎	52	260	I
312 国道 K2048~K2050	梁峁斜坡上部	Q ₃	凸形坡, 约 30°	较完整	较少未统计		IV
312 国道 K1923~K1925	梁峁斜坡下部	Q ₃	凹形、阶梯形坡< 30°	较完整	55	137	II

注: 统计范围为道路两侧各100 m

着不同程度的影响, 为更客观地反映其影响大小, 采用集体经验判定法确定所取各因素的权重值为

$A=\{a_1\ a_2\ a_3\ a_4\}=\{0.3\ 0.4\ 0.15\ 0.15\}$ (6)

2.1.5 建立模糊综合评判模型

模糊综合评判模型可表示为 $B=A\circ R$, $B=(b_1\ b_2\ b_3\ b_4)$, 它是 V 上的一个模糊子集, 对于 $A\circ R$ 采取加权平均模型

$$b_j=\sum_{i=1}^n(a_jr_{ij})$$
 (7)

2.1.6 根据最大隶属原则进行模糊综合评判

$\theta=\max(b_1\ b_2\ \cdots\ b_4)$ (8)

若 $b_i=\theta$, 则样本属于 v_i 类型。

对于 312 国道 K1914~K1916 段, 由式(5)~(7)可知

$B=\{0\ 0.55\ 0.45\ 0\}$

由最大隶属原则可知该路段属较强发育区。根据以上步骤可对其他路段分别进行评价(表 3)。

2.2 模糊评判结果分析

首先将模糊评判结果和洞穴发育频率作对比, 强发育区频率高, 弱发育区频率低, 评判结果与实际情况基本相符, 说明了这种方法的可信性。可以将该法用于整个线路预测洞穴的发育情况。

预测时, 应按照公路沿线不同地貌特征区分出预测单元, 然后根据各路段地质条件特征按照所分等级打分, 再经过模糊综合评判步骤, 最后得出该段黄土洞穴的发育程度。对于 312 国道静宁—定西段, 以 K2030~K2032、K1969~K1972、K2012~K2013 等里程段黄土洞穴发育程度最高, 密度最大, 为强发育区, 约占总里程段的 26.6%; 较强发育区在总里程段内所占比例为 25.6%, 主要集中在静宁县城以东的部分路段等; 中等发育区及弱发育区所占比例分别为 17.6%、30.2%。

需要说明的是, 模糊评判法得到的预测分析结果是一种总体发育程度的区分, 反映了所考虑的各

因素对洞穴发育分区的综合影响程度。也就是说当预测段为极高发育区时, 并不意味着该段黄土洞穴的发育频率一定就高, 而是表明该段已具备了黄土洞穴发育的有利条件。

3 结语

(1)黄土洞穴的发育受多种地质因素影响, 在预测指标选取时, 主要考虑地形地貌等一些宏观地质因素, 由于这些因素相对易于掌握, 并在一定时间和空间内不会产生大的变化, 因此预测结果可用于黄土区已建公路洞穴灾害的防治或作为拟建公路选线设计的依据。

(2)模糊评判分析中, 由于对定性的影响因素进行了量化处理, 很大程度上减少人为的主观因素, 因此评价结果是合理可靠的。

参考文献:

[1] 彭建兵, 李喜安. 黄土洞穴的环境灾害效应[J]. 地球与环境, 2005, 23(4): 1-7.

[2] 彭建兵, 李喜安. 公路黄土暗穴分布规律研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(6): 1-5.

[3] 苏生瑞, 彭建兵. 黄土洞穴对公路的危害研究[J]. 公路, 2004(11): 201-207.

[4] 李喜安, 彭建兵. 公路黄土洞穴灾害与水土流失研究[J]. 公路, 2004(12): 70-73.

[5] 彭建兵, 范 文. 探测湿陷性黄土暗穴技术研究[R]. 西安: 长安大学, 2004.

[6] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2000.

[7] Zadeh L A. Fuzzy Sets As a Theory of Possibility[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1978, 1(1): 18-39.

[8] 李喜安, 彭建兵. 湿陷性黄土地区土壤洞穴侵蚀研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(2): 28-32.

[9] 卢全中, 彭建兵. 黄土高原地区黄土裂隙发育特征及其规律研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 192-194.

[10] 王景明, 倪玉兰. 黄土构造节理研究及其应用[J]. 工程地质学报, 1994, 2(4): 31-42.