维普资讯 http://www.cqvip.com

第27卷第1期 防灾减灾工程学报 Vol. 27 No. 1
2007年2月 Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering Feb. 2007

天山公路沿线地质灾害危险性模糊综合评判

——以K576+800～K690+000段为例*

赵立冬，傅荣华，张 博

（成都理工大学工程地质研究所，成都 610059）

摘要：主要运用模糊综合评判方法，对天山公路沿线地质灾害危险性进行分区评价。以天山地区国道217线（K576+800～K690+000段）公路沿线地质灾害为研究对象，通过对野外现场调查资料与已有地质资料的分析，建立了适合高寒山区实际地质环境条件的公路沿线崩塌、滑坡、泥石流等灾害的评价指标体系。利用层次分析法确定该评价指标体系中评价因子的权值，运用两级模糊综合评判法对研究区的地质灾害分区进行定量评价。根据最大隶属度原则得出每一区段的危险性评价结果，按地质灾害危险性等级对研究区进行区划。此评价结果可供今后该段公路沿线地质灾害防治参考。

关键词：公路沿线地质灾害；层次分析法；模糊综合评判

中图分类号：P694 **文献标识码**：A **文章编号**：1672-2132(2007)01-0096-05

0 引言

天山公路始建于1973年，10年后建成通车。但受当时资金、技术、材料等方面因素限制，加之复杂的地形、地质条件和恶劣的气候环境等因素影响，公路沿线地质灾害（滑坡、崩塌、泥石流）和雪崩、水毁等灾害频繁发生，严重影响公路畅通。本文仅对该公路K576+800～K690+000段地质灾害危险性进行分区段定量评价。

1 评价指标体系的建立

评价1个地区地质灾害的危险性，可以从2个方面进行：一是这个地区的自然条件、地质环境条件、人类工程经济活动状况等；二是这一地区历史上致灾地质作用的发生情况，包括致灾地质作用规模、密度、频次等[1]。地质灾害危险性分析的指标主要是历史致灾地质作用情况和影响致灾地质作用发育的各种条件的分析。考虑研究区特殊的环境条件，通过对研究区地质灾害环境的调查分析，对研究区公路沿线崩塌、滑坡、泥石流等灾害，选定的影响因素主要有以下11种：

（1）地层岩性（C_1）。地层岩性对崩塌、滑坡、泥石流发生危险性的影响表现在地层结构和岩性2个方面。一般来说，岩性越软，越容易产生破坏；软硬相间的地层结构也容易产生破坏。

（2）地面坡度（C_2）。一般来说，1个区域内，地面坡度越大，地质灾害发生的规模和概率也越大。

（3）相对高差（C_3）。单元内最高点海拔与最低点海拔即为流域最大相对高差。一般来说，流域相对高差越大，山坡稳定性越差，崩塌、滑坡和泥石流等不良地质现象越发育。

（4）断裂构造密度（C_4）。即单位面积内断裂构造的长度（km/km^2），1个地区断裂构造越发育，岩石越破碎，岩体稳定性越差，越容易形成崩塌、滑坡，也为泥石流活动提供了物质来源。地质构造对地质灾害的影响，主要体现在断层以及特殊构造体系的宏观区域控制作用上，一般情况下，断层及特殊构造体系部位的地质灾害分布密度较大。

（5）多年平均降雨量（C_5）。在干旱和半干旱山区，降水是诱发崩塌、滑坡、泥石流灾害的直接因素，其多年平均降雨量与崩塌、滑坡、泥石流的发生有十分密切的相关关系。

（6）冻融作用（C_6）。冻融作用是高寒山区斜坡变形破坏的重要外动力因素之一，在斜坡表层易产生冻胀、冰劈、冻融泥流等浅部冻融现象。在一定条件下，季节性冻融作用的结果可导致斜坡体内地下水

* **收稿日期**：2006-04-21；**修回日期**：2006-05-16

作者简介：赵立冬（1978-），女，硕士研究生。主要从事边坡工程方面的研究。Email：zhaolidong978@163.com

维普资讯 http://www.cqvip.com

的富集和扩展，斜坡土体大范围软化和自重增大，以及静、动水压力增高等冻结滞水效应，从而影响到斜坡深处，降低其整体稳定性，以至促发崩塌滑坡。冻融作用的强烈程度主要取决于岩土的抗冻性和区内温度变化。

(7)地震强度(C_7)。地震是诱发山区崩塌、滑坡的直接因素之一。地震烈度越大，地震产生的破坏性就越大，从而引发崩塌、滑坡、泥石流灾害的规模和概率就越大。

(8)植被覆盖率(C_8)。一般植被覆盖率小的区域岩石裸露，易遭风化侵蚀，水土保持能力差，易产生地表径流，从而易引起滑坡、泥石流灾害，故其占的面积越大，形成崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的危险性越大。

(9)开挖深度(C_9)。为公路轴线处最大开挖深度，山区公路建设中由于受线型和地形地貌的限制，局部地段开挖过大，易诱发地质灾害。

(10)灾害分布密度(C_{10})。单位面积内崩塌、滑坡、泥石流等灾害的数量(个/km^2)直接反映了崩塌、滑坡、泥石流等灾害的发育现状，是 1 个地区这类地质现象发育程度的客观反映，是地质灾害危险程度评判中的重要的因子。

(11)灾害规模(C_{11})。在相同的环境条件下，致灾体的规模(体积)是造成灾害损失不同的重要因素，因此，出现过大规模崩塌、滑坡、泥石流的地区，地质灾害危险性高。以划分单元内最大规模的致灾体为准，代表规模因子的危险度，因为单元内最大规模的灾害体表明单元内具备可能产生同等规模灾害的条件。

在上述指标体系构建原则的基础上，针对高寒山区地质环境的特点，选取的评估指标体系的一级指标是分类指标，主要考虑地质环境条件 U_1(因子 C_1～C_4)、破坏动力条件 U_2(因子 C_5～C_9)和历史状况 U_3(因子 C_{10}～C_{11})三方面；二级指标为结构指标，包含与灾害相关的若干因子(C_1～C_{11})。

2　评价因子的取值和分级

为了同国土资源部《建设用地地质灾害危险性评估技术要求》[2]中的规定一致(地质灾害危险性划分为地质灾害危险性大、中、小 3 个等级)，将评价因素的指标界限按其质量状况也分为 3 个等级。参评因子对 3 个危险性等级评价标准的基准值是根据有关规范、标准，结合研究区的实际情况给出的，同时考虑到未来的可行性，尽量使其量化。综上所述，建立了如表 1 所示的地质环境评价与地质灾害预测评价因子基准值划分表。

表 1　地质灾害危险性评价因子基准值划分

Table 1　Reference value division of geological disaster risk assessment factor

指标	级别		
	危险性小	危险性中等	危险性大
地层岩性	岩石坚硬～较坚硬，结构完整～较完整(<1)	岩石较破碎，结构不完整(1≤，<3)	岩石破碎，有软弱结构面，岩土体不完整
地面坡度/(°)	<20	20≤，<35	≥35
相对高差/m	<100	100≤，<300	≥300
断裂构造密度/($km \cdot km^{-2}$)	≤0.05	0.05≤，≤0.2	≥0.2
多年平均降雨量/mm	<200	200≤，<600	≥600
冻融作用	轻微或无(<1)	作用颇严重(1≤，<3)	作用严重和极严重(≤3)
地震烈度/度	<6	6≤，<8	≥8
植被覆盖率/%	≥30	10<，<30	≤10
开挖深度/m	岩质边坡深度小于 10；土质边坡深度小于 6	岩质边坡深度 10～20；土质边坡深度 6～15	岩质边坡深度大于 20；土质边坡深度大于 15
灾害分布密度/(个 · km^{-2})	<0.2	0.2≤，<1	≥1
灾害规模	小型(<1)	中型(1≤，<3)	大型(≤3)

注：灾害规模按崩塌、滑坡、泥石流分别给出划分基准值为：崩塌体积小于 500 m^3 为危险性小，大于 500 m^3 小于 5 000 m^3 为危险性中等，大于 5 000 m^3 为危险性大；滑坡体积小于 1×10^4 m^3 为危险性小，大于 1×10^4 m^3 小于 10×10^4 m^3 为危险性中等，大于 10×10^4 m^3 为危险性大；泥石流松散物贮量小于 1×10^4 m^3 为危险性小，大于 1×10^4 m^3 小于 5×10^4 m^3 为危险性中等，大于 5×10^4 m^3 为危险性大。其中定性指标根据危险性等级赋予 1、3 为其边界数值。

维普资讯 http://www.cqvip.com

3 模糊综合评判法定量评价

3.1 建立模糊集合

(1)建立评价集

$$V=\{V_1,V_2,V_3\}=\{\text{Ⅰ},\text{Ⅱ},\text{Ⅲ}\} \tag{1}$$

式中 V_1 表示地质灾害危险性小；

V_2 表示地质灾害危险性中等；

V_3 表示地质灾害危险性大。

(2)确定参评要素集

$$U=\{U_1,U_2,U_3\} \tag{2}$$

式中 U_1 表示地质环境条件；

U_2 表示破坏动力条件；

U_3 表示历史状况。

(3)选择参评要素的评价因子集

$$\begin{aligned}C(u_1)&=\{C_1,C_2,C_3,C_4\}\\C(u_2)&=\{C_5,C_6,C_7,C_8,C_9\}\\C(u_3)&=\{C_{10},C_{11}\}\end{aligned} \tag{3}$$

式中 C_1 为地层岩性；

C_2 为地面坡度；

C_3 为相对高差；

C_4 为断裂构造密度；

C_5 为多年平均降雨量；

C_6 表示冻融作用；

C_7 为地震强度；

C_8 为植被覆盖率；

C_9 为开挖深度；

C_{10} 为灾害分布密度；

C_{11} 为灾害规模。

3.2 确定隶属函数

考查因子 $C=\{C_1,C_2,C_3,C_4,C_5,C_6,C_7,C_8,C_9,C_{10},C_{11}\}$ 和评价集 $V=\{V_1,V_2,V_3\}$，对于定量指标各因子基准界限值可统一表示为 $<a_1,a_1\sim a_2,>a_2$，其中 $a_1<a_2$。各因子的隶属函数，可采用以下统一形式：

$$u_1(x)=\begin{cases}1 & x<a_1\\ \dfrac{(a_1+a_2)-2x}{a_2-a_1} & a_1\leqslant x\leqslant\dfrac{a_1+a_2}{2}\\ 0 & \dfrac{a_1+a_2}{2}\leqslant x\end{cases} \tag{4}$$

$$u_2(x)=\begin{cases}0 & x<a_1\\ 1-\dfrac{(a_1+a_2)-2x}{a_2-a_1} & a_1\leqslant x\leqslant\dfrac{a_1+a_2}{2}\\ 1-\dfrac{2x-(a_1+a_2)}{a_2-a_1} & \dfrac{a_1+a_2}{2}\leqslant x<a_2\\ 0 & a_2\leqslant x\end{cases} \tag{5}$$

$$u_3(x)=\begin{cases}0 & x<\dfrac{a_1+a_2}{2}\\ \dfrac{2x-(a_1+a_2)}{a_2-a_1} & \dfrac{a_1+a_2}{2}\leqslant x<a_2\\ 1 & a_2\leqslant x\end{cases} \tag{6}$$

式中 $u_i(x)$ 为各评价因子的隶属函数；

x 为评价因子的实际值；

a_1,a_2 为评价因子对评价级别的基准界限值，其值根据有关规范、标准，结合实际情况给出。对森林覆盖率的隶属函数则与上述对应级别相反。

对于定性指标，通过给相应的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ等级赋予边界值1、2、3，就可以通过以上的公式确定其隶属函数。

3.3 模糊矩阵

利用隶属函数求评价因子对危险性级别的隶属度，构成模糊关系矩阵[3]。一级评价模糊关系矩阵

$$\boldsymbol{R}_{(u)}=(r_{uij})_{n\times 3} \tag{7}$$

式中 r_{uij} 为 U 要素 i 因子对于评价等级 j 的隶属度；

n 为 U 要素参评因子个数。

二级评价模糊关系矩阵

$$\boldsymbol{R}=(\boldsymbol{R}_{(u)})_{m\times 3} \tag{8}$$

式中 m 为要素个数。

3.4 层次分析法确定权值

3.4.1 建立评价系统层次分析结果模型

以地质灾害危险性为总目标层，以地质环境条件、破坏动力、历史状况为要素层，各影响因素为评价因子层，建立层次结构模型[4]。

3.4.2 构建判断矩阵

采用1-9标度法对各层中的因子对上一层次目标的相对重要性进行两两比较，构造判断矩阵；计算出最大特征根、对应的特征向量、各层次的单排序；进行判断矩阵一致性检验。各层判断矩阵计算结果见表2～表6。

表2 *A-U* 层判断矩阵

Table 2 Judgment matrix of *A-U* tier

A	U_1	U_2	U_3	W
U_1	1	2	2	0.500
U_2	1/2	1	1	0.250
U_3	1/2	1	1	0.250

$\lambda_{max}=3.0$，$CI=0$，$RI=0.58$，$CR=0<0.1$，满足一致性检验

维普资讯 http://www.cqvip.com

表 3　U_1-C 层判断矩阵

Table 3　Judgment matrix of U_1-C tier

U_1	C_1	C_2	C_3	C_4	W
C_1	1	2	2	1	0.333
C_2	1/2	1	1	1/2	0.167
C_3	1/2	1	1	1/2	0.167
C_4	1	2	2	1	0.333

$\lambda_{max}=4.0, CI=0, RI=0.9, CR=0<0.1$，满足一致性检验

表 4　U_2-C 层判断矩阵

Table 4　Judgment matrix of U_2-C tier

U_2	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	W
C_5	1	3	2	4	2	0.38
C_6	1/3	1	1	2	1/2	0.14
C_7	1/2	1	1	2	1/2	0.15
C_8	1/4	1/2	1/2	1	1/2	0.09
C_9	1/2	2	2	2	1	0.24

$\lambda_{max}=5.2, CI=0.038, RI=1.12, CR=0.034<0.1$，满足一致性检验

表 5　U_3-C 层判断矩阵

Table 5　Judgment matrix of U_3-C tier

U_3	C_{10}	C_{11}	W
C_{10}	1	2	0.667
C_{11}	1/2	1	0.333

$\lambda_{max}=2.0, CI=0, RI=0, CR=0<0.1$，满足一致性检验

表 6　层次总排序

Table 6　General taxis of arrangement

层次 C	层次 U			层次 C 总排序权值
	U_1	U_2	U_3	
	0.500	0.250	0.250	
C_1	0.333	0	0	0.166 5
C_2	0.167	0	0	0.083 5
C_3	0.167	0	0	0.083 5
C_4	0.333	0	0	0.166 5
C_5	0	0.38	0	0.095 8
C_6	0	0.14	0	0.035 4
C_7	0	0.15	0	0.038 4
C_8	0	0.09	0	0.022 1
C_9	0	0.24	0	0.058 3
C_{10}	0	0	0.667	0.166 8
C_{11}	0	0	0.333	0.083 3

层次总排序的一致性检验：$CR=0.006<0.1$，满足一致性检验

3.5　模糊变换与综合评判

采用 $M(\cdot,+)$ 模糊变换算子进行模糊变换，一级综合评价

$$\boldsymbol{B}_{(U_i)}=\boldsymbol{W}_{(U_i)}\boldsymbol{R}_{(U_i)} \tag{9}$$

由一级评价结果 $B_{(U_i)}$ 组成二级综合评判模糊关系矩阵，进行二级模糊变换 $\boldsymbol{B}=\boldsymbol{W}\boldsymbol{R}$。根据最大隶属度原则，评判计算单元所属危险性级别（文献[3]）。

3.6　评价单元的划分及计算

为了解公路沿线两侧山体地质灾害以及潜在地质灾害的发育分布特征，以公路路线长 2 km、公路轴线两侧 500 m 的范围作为一个分析单元。本文在划分该公路沿线环境地质评价单元时，将公路沿线划分为 50 个评价单元。因公路主要经过山区，所以划分单元时从斜坡的完整性出发，以地形地貌相对突变边界和岩性突变边界为单元边界。处理单元边界时，对于长度小于 1 km 的单元，归入临近单元，长度大于 1 km 的，按独立单元处理。

以第八单元（K601+140～K603+140）为例，评价单元内地质灾害点 6 个，地质灾害以泥石流为主，滑坡和崩塌各有 1 处，泥石流规模最大者有 1.2×10^4 m^3；岩土体类型为石炭小硅化石灰岩和第四系的洪积物；地形相对高差大于 300 m，植被覆盖率较低；人为活动主要是交通建设用地，最大开挖深度 20 m 左右。

根据上述条件，利用隶属函数求得模糊关系矩阵如下：

$$\boldsymbol{R}_{(U_1)}=\begin{bmatrix}0.75 & 0.25 & 0\\ 0 & 0.44 & 0.56\\ 0 & 0 & 1\\ 0.33 & 0.67 & 0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{(U_2)}=\begin{bmatrix}0 & 0.5 & 0.5\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0.5 & 0.5\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{(U_3)}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 1\\ 0.84 & 0.16 & 0\end{bmatrix} \tag{10}$$

进行一级模糊变换：

$$\boldsymbol{B}_{(U_1)}=\boldsymbol{W}_{(U_1)}\boldsymbol{R}_{(U_1)}=(0.36,0.38,0.26)$$

$$\boldsymbol{B}_{(U_2)}=\boldsymbol{W}_{(U_2)}\boldsymbol{R}_{(U_2)}=(0.00,0.50,0.50)$$

$$\boldsymbol{B}_{(U_3)}=\boldsymbol{W}_{(U_3)}\boldsymbol{R}_{(U_3)}=(0.28,0.05,0.67) \tag{11}$$

由此得二级模糊关系矩阵：

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}0.36 & 0.38 & 0.26\\ 0 & 0.52 & 0.48\\ 0.28 & 0.05 & 0.67\end{bmatrix} \tag{12}$$

作二级模糊变换 $\boldsymbol{B}=\boldsymbol{W}\boldsymbol{R}=(0.25,0.33,0.42)$，根据最大隶属度原则判别，本区段为危险性大。

3.7　评价结果分析

根据上述原则对公路沿线的地质灾害危险性分区

维普资讯 http://www.cqvip.com

段进行评估，每一段危险性等级以隶属度来表达，即以单因子隶属度运用模糊数学方法进行评判，得出每一区段地质灾害危险性各等级的隶属度，然后根据隶属度最大性原则得出每一区段的危险性评价结果。

由计算结果可以看出，危险性大的区域基本分布在K627+000～K662+540段内，该区域处于海拔2 500 m以上的高山地区，地质条件复杂，植被覆盖率极低，冻融作用十分强烈，岩体破碎，各种灾害相继出现，其它个别Ⅲ类地段的出现是由于局部灾害密度较大所造成的；危险性中等的区域相对较少，是因为地质环境条件相对较好，但由于发生了一些影响公路的地质灾害，从而计算结果显示其为Ⅱ类；危险性小的区域占据公路的绝大部分里程，一般位于较为平缓的山间平原或山前平原，地质环境条件较好，植被发育，地质灾害历史发育程度和规模都很低，计算结果表明其为Ⅰ类。

4 结论

本文采用目标分析方法，构建了高寒山区地质灾害综合评估的指标体系。通过应用模糊综合评判法对研究区进行了地质灾害危险性综合评估和区划。公路沿线地质灾害危险性等级分区可分为3个区段，K627+000～K662+540段公路沿线地质灾害危险大，与野外调查结果基本相符。本文的评价结果，可供该公路今后地质灾害防治参考，因此具有一定的实用价值。

参考文献：

[1] 柳 源. 中国地质灾害(以崩、滑流为主)危险性分析与区划[J]. 中国地质灾害与防治学报，2003，14(1)：95-99
Liu Y. Risk analysis and zoning of geological hazards (chiefly landslide, rock fall and debris flow) in China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(1): 95-99

[2] 国土资源部. 建设用地地质灾害危险性评估技术要求(试行)[Z]. 国土资发[2004]69号文件附件，2004
The Land And Resources Department. Technique request of geological disaster assessment of risk on building site (try out) [Z]. The land and resource publish[2004]No. 69 affix, 2004

[3] 张 跃，邹寿平，宿 芬. 模糊数学方法及其应用[M]. 北京：煤炭工业出版社，1992
Zhang Y, Zou S P, Su F. Fuzzy Mathematics Method and Its Application[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1992

[4] 夏元友. 用层次分析法优级选边坡治理方案[J]. 中国地质灾害与防治学报，1997，8(3)：1-6
Xia Y Y. Choosing optimum control plans for unstable slopes by using of the analytic hierarchy process (AHP)[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1997, 8(3): 1-6

Fuzzy Integrate Risk Evaluation of the Geological Hazard along Tianshan Highroad

——Taking the K576+800～K690+000 as a sample

ZHAO Li-dong, FU Rong-hua, ZHANG bo
(Iinstitute of Engineering Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: This paper utilizes fuzzy integrate evaluation method to assess geological disaster along Tianshan highroad. It takes the geological hazards along the Tianshan highroad as the study object. The author founds the appraising system of geological hazards such as slide and debris flow for cold mountain region area through analyzing the material which was achieved from field investigation. The author ascertains the weights of evaluation factor with the analytic hierarchy process method and evaluates quantificationally the risk with fuzzy integrate evaluation, then deduces the estimate result about fatalness with principle of maximal feudatory to every section. The evaluate results can supply reference in the work of geological hazards prevention along this highroad.

Key words: highroad geological disaster; hierarchy process method; fuzzy synthetic evaluation