

# 地震次生地质灾害风险评估集对态势分析

龚士良<sup>1,2</sup>

(1.中国地质调查局地面沉降研究中心,上海 200072; 2.上海市地质调查研究院,上海 200072)

**摘要:** 5.12四川汶川8级强震引发了大量次生地质灾害,加剧了灾情并严重影响抗震救灾。地震次生地质灾害受多重因素制约,其孕育与致灾过程具有不确定性。利用集对分析原理与方法,对地震次生地质灾害进行同异反态势分析,拟定了风险评估的集对分析同一度、差异度、对立度等指标体系的构建原则与赋值标准,对承灾体系统的不确定性及其作用作了刻画与分析,建立了不同风险分区代表性的集对分析联系度表达式,为地震灾害研究提供了可资借鉴的新思路和技术方法。

**关键词:** 地震次生地质灾害; 风险评估; 集对分析; 评价指标体系

**中图分类号:** P315.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-0995(2010)01-0118-05

2008年5月12日四川汶川八级强震引发了大量次生地质灾害,险情严重,危害巨大,不仅加剧了地震灾情,也严重影响抗震救灾工作。震后调查,强震引发地质灾害15 000多处;崩塌滑坡形成坝高超过10m的高危堰塞湖33座;潜在隐患点10 000多处,仅四川极重灾区新增的地质灾害隐患点就达2 782处,为震前的2.38倍;地震次生地质灾害直接造成的人员死亡估计约2万人<sup>[1]</sup>。5.12地震引发的地质灾害数量与规模史无前例,基础设施损毁严重,人员伤亡极为惨痛。

地震次生地质灾害的孕育与发展受多重因素制约,其过程具有诸多不确定性,风险评估是灾害防御的重要环节。根据我国学者赵克勤先生创立的处理系统不确定性问题的“集对分析”理论<sup>[2]</sup>,利用集对态势分析方法,探讨地震次生地质灾害风险评估新的技术途径,以助于提高防灾抗灾减灾的综合能力,并为地震灾害研究提供有益借鉴。

## 1 地震次生地质灾害特性

### 1.1 我国地震与地质灾害概况

中国是世界上地震灾害损失最严重的国家之一,全国50%以上的城市和70%左右的大中城市位于度及以上烈度区内,主要的损失分布在以北京为中心的首都圈地区和云南—四川—陕西—内蒙古相连的南北带上,新疆的西北部也是地震损失较大的地区。东部沿海地区、首都圈地区及内陆的个别地区防震减灾能力较强;而中部(南北带)和西部地区地震灾害的风险与危害性很高<sup>[3]</sup>。

我国的地震从频率分布看,大致以宁夏、甘肃、四川和云南为界,中国西部地区3级以上的地震发生频率高于东部地区;从烈度分布看,甘肃、陕西、宁夏、山西、河北、四川、云南等位于地震带内的区域在发生地震时产生的烈度较高<sup>[4]</sup>。

我国的地质灾害以丘陵山地型、突发型占主导,其中崩塌、滑坡、泥石流等典型类型占绝对比重。中国中西部呈条块状分布的丘陵山地地区,是集中而高发的重点区域;滨海平原及内陆构造盆地等第四纪厚覆盖地区则以地面沉降等缓变型地质灾害为主。2005年至2008年9月,全国共发生地质灾害179 255起,崩塌、滑坡、泥石流共计174 160起,占97.16%,其总比例的年际变化差异

表1 我国近年地质灾害发生总量与类型构成比例

年份	地质灾害(起)	滑坡(起/%)	崩塌(起/%)	泥石流(起/%)	地面塌陷(起/%)	地裂缝(处/%)	地面沉降(处/%)
2005	17751	9359/52.72	7654/43.12	566/3.19	137/0.77	20/0.11	15/0.08
2006	102804	88523/86.11	13160/12.80	417/0.41	398/0.39	271/0.26	35/0.03
2007	25364	15478/61.02	7722/30.44	1215/4.79	578/2.28	225/0.89	146/0.58
2008	22758	12050/52.95	7130/31.33	685/3.01	606/2.66	2219/9.75	68/0.30
2009	10578	6544/61.86	2241/21.19	1416/13.39	257/2.43	103/0.97	17/0.16
合计	179255	131954/73.61	37907/21.15	4299/2.40	1976/1.10	2838/1.58	281/0.16

注:数据未含港澳台地区;2008年度为1~9月份数据;根据国土资源部《全国地质灾害》公布数据整理。

收稿日期:2009-03-17

基金项目:国土资源部首批百名优秀青年科技人才计划(200218)

作者简介:龚士良(1965-),男,上海人,博士,教授,中国地质调查局地面沉降研究中心秘书长,主要从事地质灾害研究

118

微弱(表1)。

## 1.2 地震构造格局与地质灾害分布关系

地震是构造运动的重要表现形式,地震活动带通常是板块运动的叠合或离析的关键部位,以及地质构造的断裂带地区。因此,地震活动与地质灾害的分布在空间上具有一定的关联,两者的孕育基础条件是相同或相近的。

我国地质灾害主要集中于地质构造结合部位,在我国中部地貌形态格局第二台阶的丘陵山地地区分布广泛。地质灾害的总体分布规律,与地质构造背景具有内在联系。构造格局具有多方面影响:改造和重塑地貌形态,形成陡峻山势、深切河谷等地貌景观特征;导致构造带高山绵延,阻隔大气环流,使来自东南的暖湿气流与来自西北的干寒气流形成交汇,促进强降雨等灾害性天气频发;活跃的构造运动,也使岩土体结构松散,稳定性明显降低。因此,我国地质灾害的分布规律与总体格局,与地震的地质构造背景具有一致性和契合关系。

## 1.3 地震对地质灾害的激发作用

地质灾害的成因有内动力型(如地震引发)、外动力型(如强降雨激发)和人为动力型(如矿山开发等诱发)。山地型地质灾害,与地震潜在震源区具有耦合性。地震活动对于地质灾害的激发作用,具有区域性的广泛影响,程度更为显著。地震常带来严重的

地质灾害,两者的伴生关系非常突出。

地震次生地质灾害包括崩塌、滑坡、泥石流、塌陷、地裂缝、砂土液化等,震级和烈度越高,次生地质灾害越严重。根据中国历史地震次生地质灾害活动程度及发生条件所作的危险性评价结果,高度和中度危险区主要分布在中国中部的陕甘宁川滇藏地区,形成一个大致 NE 向高危险带,其余大部分地区为轻度危险区<sup>[5]</sup>。

地震通常具有连续性,尤其是强震之后,伴随着地应力的重新分布,余震不断,岩土体因此遭受多次破坏,稳定性迅速降低,特别是地震后常有降雨发生,更使灾害隐患迅速发展,危害进一步加剧。因此,地震次生地质灾害极为危重,多重叠加作用将使险情和灾情显著增强。此次汶川地震的余震多达 9 100 多次<sup>[6]</sup>,其次生地质灾害灾情深重。而饱受地震侵扰的我国台湾地区,在 20 世纪超过 6 级的地震就高达 10 余起,次生地质灾害成为重要的环境地质问题<sup>[7]</sup>。

## 2 地震次生地质灾害集对态势分析

### 2.1 基本原理与方法

赵克勤先生创立的“集对分析”是系统工程中处理不确定性问题的重要理论。该理论认为不确定性客观而普遍地存在于各种事物与系统之中,是运动与发展的内在属性与具体表现,并将矛盾统一体中的基本单位称为“集对”,组成集对的两个集合间的联系具有同一、差异、对立关系(简称同异反)和既确定又不确定的特征,通过研究其联系、可变与转化,认识和把握由此组成的系统的运动发展规律,进而分析处理各类纷繁复杂的现实问题<sup>[8]</sup>。

集对分析理论的核心思想是将系统内确定与不确定性予以辩证分析与数学处理,体现系统、辩证、数学三个特点,引入联系度及其数学表达统一描述各种不确定性,从而实现了对不确定性的分析处理<sup>[9]</sup>。

联系度及其数学表达建立的基本准则如下:

设根据问题 W,对由集 A 和集 B 所组成的集对 H 展开分析,共得到 N 个特性,其中有 S 个为集对中两个集合所共有,这两个集合又在 P 个特性上相对立,在其余的 F 个特性上关系不确定,则在不计各特性权重的情况下,称: S/N 为集合 A 与集合 B 在问题 W 下的同一度,简记为 a; F/N 为集合 A 与集合 B 在问题 W 下的差异度,简记为 b; P/N 为集合 A 与集合 B 在问题 W 下的对立度,简记为 c。由于同一度、差异度、对立度是从不同侧面刻画两个集合的联系状况,因此为全面描述系统总的联系态势,采用如下表达式:

$$\mu(W) = S/N + (F/N)i + (P/N)j = a + bi + cj$$

式中的 i 为差异不确定度的系数,视不同情况在[-1, 1]区间取值,有时 i 仅起标记作用; j 为对立度系数,取值-1,有时 j 也仅起标记作用;  $\mu$  为联系度,在一般情况下表示等式右边的式子,特殊情况下则

是一个数值,此时称为联系数。

a、b、c可据实际情况予以不同的界定,并可通过多重方式对复杂系统予以综合刻画。如对诸多影响因子进行多元权重分析,对系统的结构层次性进行递阶分解,对作用因子的组合效应采用矩阵分析,对作用过程采用时间函数等,从而全面地进行系统状态及其性质变化的比较分析与深入研究。根据集对分析理论,在同一度 a、差异度 b、对立度 c 归一化条件下,系统的态势如表 2 所示:

表 2 同异反关系及其系统态势

序号	同异反逻辑关系	数值大小顺序*	态势	态势级别
1	a>c, a>b, b>c	a, b, c	强同势	同势 1 级
2	a>c, a>b, b=c	a, (b, c)	次同势	同势 2 级
3	a>c, a>b, b<c	a, c, b	准同势	同势 3 级
4	a>c, a=b, b>c	(a, b), c	弱同势	同势 4 级
5	a>c, a<b, b>c	b, a, c	微同势	同势 5 级
6	a=c, a>b, b<c	(a, c), b	强均势	均势 1 级
7	a=c, a=b, b=c	(a, b, c)	准均势	均势 2 级
8	a=c, a<b, b>c	b, (a, c)	弱均势	均势 3 级
9	a<c, a>b, b<c	c, a, b	微反势	反势 5 级
10	a<c, a=b, b<c	c, (a, b)	弱反势	反势 4 级
11	a<c, a<b, b>c	b, c, a	准反势	反势 3 级
12	a<c, a<b, b=c	(b, c), a	次反势	反势 2 级
13	a<c, a<b, b<c	c, b, a	强反势	反势 1 级

\*数值以递减为序,括号内为数值相等。

## 2.2 地震次生地质灾害集对分析

在现有认识水平和技术条件下,地震及次生灾害的孕灾过程与致灾预警尚有诸多不确定性,而灾害防御与抗灾减灾本身也是一项涉及面广的系统工程。因此,借助集对分析理论与方法,无疑是地震灾害研究的新技术途径。

地震次生地质灾害的形成必须具备致灾体与承灾体两方面的条件,其不仅决定灾害是否发生,也决定成灾规模的大小,而其变化发展与相互作用通常又是难以精准确定的。致灾体与承灾体是典型“集对”,而其中蕴涵的诸多不确定性又为“集对分析”的应用提供了充分而广阔的空间。

以地震次生地质灾害的致灾过程作为研究对象,依据集对分析理论方法,其联系度关系式  $\mu = a + bi + cj$  的内涵界定为:  $\mu$  为孕灾过程联系度;  $a$  为地质环境条件状态标量;  $b$  为次生地质灾害孕育过程状态标量;  $c$  为激发因素状态标量;  $i$  为不确定性标度;  $j$  为对立性标度。  $a$  表征地质灾害发生的基础条件,是相对静态的,也是充分性衡量指标,  $a$  值越高,具备的条件越充分,灾害越容易发生。  $b$  表征灾害孕育与发展的态势,也可指代灾害的发生概率,是相对不确定的指标,  $b$  值越大,灾害特性越趋明显,  $b$  值超过某一阈值,系统性质将发生突变,灾害过程开始形成并显现。在临近变化拐点的区间域范围,可作为警戒预报。因此,  $b$  值也可作为灾害预警指标。  $c$  表征灾害激发要素的活动强度,是相对动态的,也是灾害发生的必要性指标。  $c$  值越大,越促使地质灾害的形成与发展,破坏性和灾害后果也越强。

$a$ 、 $b$ 、 $c$  是描述和刻画系统状态与变化的三个重要指标,分别对应同一、差异、对立。在此三个指标中,同一度  $a$  与对立度  $c$  是相对确定的,而差异度  $b$  是不确定的。实际情况的复杂性,有时也使  $a$ 、 $c$  同样具有不确定性,而  $b$  也有确定性的方面。因此,可通过结构层次的递阶分解,展开对系统的综合分析。

据此,根据同一度  $a$  与对立度  $c$  相对确定的同态性原理,建立评估对象分析预测的同态模型,再根据差异度  $b$  所蕴涵的边界性原理,确定评估对象的边界条件,从而使分析具体化,并依此分析未来状态与现实状态之间评价目标的数量与转化关系,得出未来预测情况下的目标值与可能趋势。由此可对众多现实问题的认识与剖析既能在宏观上清晰把握,也能在微观层面透彻解析。

## 2.3 风险评估同异反指标体系

### 2.3.1 同异反赋值标准

系统状态及性质变化是系统内在及外部各种影响因素相互作用的结果与综合反映,是矛盾的对立统一的具体表现形式。依据集对分析,指标体系的构建实际上也就是对同一度、差异度、对立度的赋值。根据实际情况,对  $a$ 、 $b$ 、 $c$  进行量化的过程,就是建立标准体系,从而实现问题的分析与处理。

根据上述准则,地震次生地质灾害风险评估的集对分析指标体系的构建与赋值如下:

1)  $a$ , 界定为地质环境条件状态标量,根据地貌形态、地质构造、岩土性质等,划分为 5 个等级,依发生次生地质灾害的充分性程度,由强至弱分别赋值 1、3、5、7、9,越大,地质条件的稳定性越高,发生地质灾害的可能性越低。

2)  $b$ , 界定为地质灾害发生可能性的状态标量,依由弱至强,分别赋值 1、3、5、7、9,越大,地质灾害发生的可能与危险度越高。差异度也是同一度与对立度相互关系与彼此制约作用不确定性的综合衡量指标,差异度越大,不确定性越高,不确定性的量化有赖于同一度与对立度指标的组合及其实际效应

的深入分析。

3) c, 界定为激发因素活动性的状态标量, 是次生地质灾害发生的必要性条件状态指标, 由弱至强, 赋值 1、3、5、7、9, 越大, 激发因素越活跃, 灾害发生的可能性越大, 危害也越高。

由此, 结合实际情况, 同异反指标体系的构建与赋值标准见表 3。

### 2.3.2 指标权重分析

根据相关研究成果<sup>[10-12]</sup>, 利用层次分析法所作的地质灾害风险评估要素的权重影响分析, 在同一度 a 中: 地貌形态的影响权重占 0.45, 地质构造占 0.23, 岩土性质占 0.32; 在对立度 c 中: 地震震级的影响权重占 0.47, 降雨强度占 0.35, 人为活动占 0.18。

在实际情况下, 各种评估要素之间具有较高一致性, 故其组合关系并不如预想的复杂和多样。如山势陡峻、河谷深切的高原山地, 其地质构造背景也大多活跃; 而低缓丘陵地区, 地质构造不甚发育或规模很小。而当发生大于 4 级的地震, 即很容易诱发次生地质灾害; 强降雨也将显著增强崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的可能性; 采矿、削坡、爆破等人为工程活动, 也将改变地质环境条件<sup>[13]</sup>, 破坏岩土体应力状态, 降低山体稳定性。因此, 以表 3 来涵盖和归纳地震次生地质灾害各类评估要素是客观和合理的。

### 2.4 风险评估态势分析

根据同异反指标体系, 拟定的地震次生地质灾害的风险评估等级及其界限区间如表 4。据此可将我国地震次生地质灾害的风险性初步划分为 5 个区域, 即: 低风险区(I 区)、较低风险区(II 区)、较高风险区(III 区)、很高风险区(IV 区)、极高风险区(V 区), 其分布特征与规律可结合地震活动、地质条件、气象因素、人为活动等客观实际, 依据评估体系的相关指标予以综合确定与系统分析。

由此, 以中值估算, 则不同等级的风险性的集对分析联系度的归一化后的表达式为:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{I}}(\text{低风险区}) &= 9/11 + 1/11 i + 1/11 j = 0.818 + 0.091i + 0.091j; \\ \mu_{\text{II}}(\text{较低风险区}) &= 8/13 + 3/13 i + 2/13 j = 0.615 + 0.231i + 0.154j; \\ \mu_{\text{III}}(\text{较高风险区}) &= 6/15 + 5/15 i + 4/15 j = 0.400 + 0.333i + 0.267j; \\ \mu_{\text{IV}}(\text{很高风险区}) &= 4/17 + 7/17 i + 6/17 j = 0.235 + 0.412i + 0.353j; \\ \mu_{\text{V}}(\text{极高风险区}) &= 2/19 + 9/19 i + 8/19 j = 0.105 + 0.474i + 0.421j; \end{aligned}$$

据此看出, 低风险、较低风险等级的同势特征明显, 稳定性相对较高; 而随着风险等级的提高, 反势特征日趋明显。

表 3 同异反指标体系

指标	赋值标准	状态描述	评估要素
a	1	极不稳定	地貌形态: 高差>1000m, 坡度>60 地质构造: 处断裂密集带和断裂复合带 岩土性质: 软弱结构发育, 岩石特别破碎
	3	很不稳定	地貌形态: 高差 500~1000m, 坡度 40~60 地质构造: 处大型断裂带 岩土性质: 有软弱结构面, 岩土体不完整, 岩石破碎
	5	不稳定	地貌形态: 高差 200~500m, 坡度 30~40 地质构造: 存在主干断裂 岩土性质: 结构不完整, 岩石较破碎
	7	不太稳定	地貌形态: 高差 100~200m, 坡度 20~30 地质构造: 仅有小型断裂 岩土性质: 结构较完整, 岩石较坚硬
	9	比较稳定	地貌形态: 高差<100m, 坡度<20 地质构造: 不发育 岩土性质: 结构完整, 岩石坚硬
b	1	可能性很低	根据同一度与对立度确定: 同一度 9、对立度 1
	3	可能性较低	根据同一度与对立度确定: 同一度 7~9、对立度 1~3
	5	可能性较高	根据同一度与对立度确定: 同一度 5~7、对立度 3~5
	7	可能性很高	根据同一度与对立度确定: 同一度 3~5、对立度 5~7
	9	可能性极高	根据同一度与对立度确定: 同一度 1~3、对立度 7~9
c	1	活跃性很低	地震震级<3 级 降雨强度<0.3mm/min 人为活动: 无矿山开发, 植被覆盖率>80%
	3	活跃性较低	地震震级 3~4 级 降雨强度 0.3~0.5mm/min 人为活动: 零星极少量开采, 植被覆盖率 60~80%
	5	活跃性较高	地震震级 4~5 级 降雨强度 0.5~1.0mm/min 人为活动: 矿山开采有一定规模, 植被覆盖率 40~60%
	7	活跃性很高	地震震级 5~6 级 降雨强度 1.0~2.0mm/min 人为活动: 矿山开发规模较大, 植被覆盖率 20~40%
	9	活跃性极高	地震震级>6 级 降雨强度>2.0mm/min 人为活动: 矿山开发规模大, 植被覆盖率<20%

从综合表达式还可看出,风险等级越高,次生地质灾害发生可能性越大,危害也越严重,其对立面也越高、同一度越小;而风险性越低,对立面越小、同一度越大。差异度也是随着风险等级的提高,而呈增长态势,反映出系统稳定性渐趋减弱。

### 3 结语

地震次生地质灾害严重威胁人民生命与财产安全,直接影响社会经济的可持续发展。地震次生地质灾害的孕育与发展,受多重因素的制约与控制,存在

诸多矛盾的对立统一及系统的不确定性。集对分析对于剖析其现象与本质以及过程分析,都是重要的理论武器和技术手段。本文借助集对态势分析,对地震次生地质灾害的风险评估进行探讨,拟定了同异反指标体系,为地震灾害的深入研究提供借鉴,以助于防灾减灾工作的规划和部署。

表4 地震次生地质灾害风险等级划分

等级	I	II	III	IV	V
风险程度	低	较低	较高	很高	极高
a	9	7~9	5~7	3~5	1~3
b	1	3	5	7	9
c	1	1~3	3~5	5~7	7~9

### 参考文献:

- [1] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16 (4): 433 ~ 444.
- [2] 赵克勤. 集对论——一种新的不确定性理论、方法与应用[J]. 系统工程, 1996, 14(1): 18 ~ 23,72.
- [3] 聂高众, 高建国, 马宗晋, 等. 中国未来 10~15 年地震灾害的风险评估[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(1): 68 ~ 73.
- [4] 刘凯, 廖顺宝, 张赛. 中国地震发生频率与烈度的空间分布[J]. 地理科学进展, 2008, 27(3): 13 ~ 18.
- [5] 刘凤民, 张立海, 刘海青, 等. 中国地震次生地质灾害危险性评价[J]. 地质力学学报, 2006, 26(2): 127 ~ 131.
- [6] 侯康明, 李丽梅, 黄耘. 汶川 8 级大震震害特征和发震断裂运动方式探讨[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28 (3): 388 ~ 393.
- [7] 龚士良. 台湾的地震灾害及其环境地质问题[J]. 灾害学, 2002, 17(4): 76 ~ 81.
- [8] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000: 114 ~ 190.
- [9] 赵克勤. 集对分析对不确定性的描述与处理[J]. 信息与控制, 1995, 24(3): 162 ~ 166.
- [10] 龚士良. 上海地面沉降层次分析法研究[J]. 系统工程, 1996, 14(3): 30 ~ 34.
- [11] 龚士良. 上海地区地质灾害危险性评估关键技术问题研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(3): 92 ~ 96.
- [12] 张梁, 张业成, 罗元华. 地质灾害灾情评估理论与实践[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 403 ~ 405.
- [13] 龚士良. 地质环境合理开发利用集对论准则[J]. 地质灾害与环境保护, 2003, 14(2): 34 ~ 38.

## SPA of Risk Assessment of Secondary Disasters of Earthquake

GONG Shiliang<sup>1,2</sup>

(1-Land Subsidence Research Center, CGS, Shanghai, Shanghai 200072; 2-Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072)

**Abstract:** Wenchuan Ms 8.0 Earthquake induced a great amount of secondary disasters of earthquake which are restricted by many factors. This paper deals with principle and standards of establishment of assessment indicator system of SPA of risk assessment of the secondary disasters and gives different expressions of SPA for various divisions.

**Key words:** secondary disaster of earthquake; risk assessment; SPA; assessment indicator system