

# 地质灾害问题的数据本构分析意义

王 园

(中国地质大学, 430074)

王 沁

(上海交通大学 200240)

郑祖国

(新疆农业大学 830052)

## 摘 要

本文结合上海市地面沉降和西安市地裂灾害问题, 阐述了数据本构分析研究地质灾害问题的方法、步骤及意义。

主题词: 地质灾害 数据本构分析

中国图书分类号: TU457

## 1 引言

地质灾害以其巨大的破坏力给受灾地区的经济造成严重的损失, 它已逐渐引起了越来越多研究者的重视。常见的地质灾害有地震、地裂、地陷、滑塌、泥石流、岩土崩塌等。在地质灾害问题的分析研究中有两类问题一直未能得到很好的解决。一是在诸多影响地质灾害的成因中, 评价何为主导因素, 何为次要因素。已往对该类问题的评判大多采用专家系统作综合分析定性评判。但这种评判的弱点是, 当几种影响因素对整体影响作用强度相近时, 定性评判就很难划分, 而且这种评判无法全面地考虑各影响因素之间的交互作用及其对总体的影响。二是在地质灾害的发展预测研究中, 如何在建立预测模型中对已知的各种影响因素给以同等考虑。已往对此类问题均采用先将高维问题分解为低维问题进行处理, 然后再拼装组合成高维预测模型。但这样处理带来了两方面的问题, 一是前面提到的各因子之间的交互作用问题; 二是无法解决“维数祸根”难题。当然这些都是分析预测研究中的棘手问题。

近年来, 我们提出的数据本构分析, 有效地解决了上述分析预测研究中的难题。用该方法对上海市的地面沉降以及西安地裂问题的分析和预测表明效果很好, 定量分析结论可靠。数据本构分析方法虽然在诸多领域都获得了良好的效果, 但在地质灾害研究领域中的应用还是首次, 并已初见成效。本文通过实例探讨了地质灾害问题的数据本构分析意义。

## 2 数据本构分析方法

数据本构的概念及其分析方法是我们在1993年首先提出, 并于1994年12月在“中国青年学者岩土工程力学及其应用讨论会”上首次公布, 得到了与会专家学者的肯定。它已在材料本构关系描述<sup>[1][2]</sup>、地面沉降分析预测<sup>[3][4]</sup>、勘察指标数据可靠性评价<sup>[5]</sup>、地裂灾害分析<sup>[6]</sup>、医学<sup>[7]</sup>等方面进行了卓有成效的尝试, 得到了较好的应用。

数据本构分析的实现过程是一个寻找多维数据结构踪迹的数学过程。如果一个数据集存在着某种规律, 则一定对应存在着一种数据结构。例如某一地点的大气温度每年、每月、每日、每时都不尽相同, 但是总体上看, 仍然具有较强的规律性。即一年有春、夏、秋、冬四季气温变化; 每日凌晨气温最低, 正午最高。这种数据规律是显见的。因此, 一定存在着对应的数据结构。找出这种数据结构, 也就找出了相应数据集的规律, 从而也就找出了所描述问题的特性规律。数据本构分析方法就是运用新型数据处理手段寻找数据的这种内在规律, 建立起用数据库表示的本质结构特性规律——数据本构。

数据本构计算分析的具体实现步骤如下:

第一, 首先选定一个初始模型, 这可以根据经验或猜想来给。

第二, 把数据投影到低维空间上, 找出数据与现有模型相差最大的投影, 这表明在这个投影中含有现有模型中没有反映出的结构。

第三, 把上述投影中所包含的结构并到现有模型上, 得到改进了的新模型。

第四, 再从这个新模型出发, 重复以上步骤, 直到数据与模型在任何投影空间都没有明显的差别为止。

### 3 地质灾害成因问题数据本构分析

地质灾害影响因素评价, 是人们在分析研究、预测地质灾害中的一个极为敏感的问题。通常对此类问题大多采用定性评判, 而无使人信服的定量分析论证。这也是许多问题一直未能达到认识上充分统一的客观原因。

数据本构分析能够解决上述难题。其操作过程如下:

- a. 搜集资料, 确定可能导致某种地质灾害的各种因素;
- b. 对描述各种致灾因素的数据信息进行归类;
- c. 确定分析的目标量和考察因子;
- d. 根据讨论问题的目的需要, 设计一种或几种考察方案;
- e. 对每一种考察方案进行数据本构计算分析, 得到各变量因子对目标量的影响相对权重(定量结论)。

近二十年来许多学者对西安地裂灾害问题作过大量的研究, 取得了许多可喜的研究成果, 特别是全面深入地対西安地裂的几何学与运动学特征、地质背景及其地球物理与地球化学特征、古地裂与地震的关系、断层活动与过量抽汲深层承压水等致裂因素以及防裂减灾的工程对策等问题进行了研究和探讨。但是, 多年来在西安地裂缝研究中, 对地裂缝的成因一直存在有争议。主要表现在: ①对在致裂成因中构造活动和抽汲深层承压水何者为主导因素的认识未统一; ②已往对这类问题的讨论多采用专家系统定性评判, 而无定量分析论证。此外, 在地裂分析研究中大多只能在低维情况下讨论, 而未将已知的各种致裂因素同时进行分析讨论。

鉴于在西安地裂研究中存在的争议, 为改进已往分析研究中的不足, 我们应用数据本构分析方法对上述问题进行分析讨论。通过对已经掌握的1956~1985年西安地裂资料<sup>[8][9][10]</sup>的分析, 概括抽取了7种量化数据(表1)。按照讨论问题目标的需要, 设计了3种计算方案(表2)。

其中用“地裂起伏活动强度  $P$ ”来反映地裂的变化,用“年最大地震震级  $M$ ”和“年地震发生次数  $n$ ”来考察地震对西安地裂的影响。大地构造运动是一个漫长的历史演化过程,它与整个大地板块的历史变迁有着密切的联系,在各种量化因素中大地构造运动与时间(年份  $Y$ )的关系最为密切。因此,我们用年份  $Y$  来替代大地构造运动考察其对西安地裂的影响。另外,针对目前许多学者对地下水位埋深  $H$ 、地面沉降量  $S$  和年开采水量  $Q$  这三者对西安地裂的影响认识不一致的问题,我们将这三者也取为独立因子,考察判明它们对地裂的影响程度。其实,承压水位埋深  $H$  和地面沉降  $S$ ,都受控于年开采水量  $Q$ <sup>[3]</sup>,因此在设计考察方案时,我们逐个去除该两项,以使主要矛盾突出,描述问题明确。

通过计算机对三种考察方案计算分析,得到各影响因子对目标量影响的相对权重,如表3所列。各影响因子对目标量影响大小评价标准见表4。

从表3中可以看出,  $L1$  方案计算结果表明,在影响地裂的地下水位埋深  $H$ 、地面沉降量  $S$  和年开采水量  $Q$  这三个因素中,  $H$  对地裂的影响最大,  $S$  对地裂的影响次之,  $Q$  对地裂的影响最小。当依次消去  $S$  和  $H$  时,我们看到年开采水量  $Q$  对地裂的影响逐渐突出。这是因为地下水位埋深  $H$  和地面沉降量  $S$  都是受年开采水量  $Q$  控制,当依次消去这些因子后,它们对地裂的影响就由  $Q$  来体现。计算分析表明  $Q$  对地裂的(直接和间接)影响约占总量的40%~70%。在三种方案中都明确反映出地震对地裂的影响最小,约占总影响量的10%~20%,大地构造运动(以年份  $Y$  来反映)约占25%~40%。根据西安几个沉降中心的资料<sup>[8]</sup>,西安地裂是临潼-长安断裂(构造运动所致)的次级断裂组,故其运动速率应小于临潼-长安断裂的运动率,平均应小于 $3\text{mm/a}$ <sup>[8]</sup>。即西安地裂活动速率只是西安地区构造运动的 $1/3$ 左右。可见数据本构计算分析的结果与此相当吻合。有关资料<sup>[10]</sup>显示,西安地裂与地震活动期具有同步性,且与地震的空间分布存在着明显的似“补偿”关系,即地裂蠕滑对抑制大震有利。也就是地裂发育的地区地震很少。在西安市区几十年来无一次地震发生,只在地震相当活跃年份才有一些微地震在西安市北郊及东部发生。这表明西安

表1 考察量说明

序号	代符	意 义
1	$P$	地裂起伏活动强度
2	$Y$	年份(年)(反映大地构造运动)
3	$H$	承压水位埋深(m)
4	$S$	地面沉降量(m)
5	$Q$	年开采水量(千万 $\text{m}^3/\text{a}$ )
6	$M$	年最大地震震级(级)
7	$n$	年地震发生次数(次)

表2 考察方法设计

序 号	方 案	目 标 量	影响因子					
			1	2	3	4	5	6
1	$L1$	$P$	$S$	$Y$	$Q$	$H$	$M$	$n$
2	$L2$	$P$	$Y$	$Q$	$H$	$M$	$n$	-
3	$L3$	$P$	$Y$	$Q$	$M$	$n$	-	-

表3 数据本构计算分析结果

目 标 量	方 案	变量因子对目标量的相对影响权重					
		$Y$	$Q$	$M$	$n$	$H$	$S$
$P$	$L1$	1.0000	0.5671	0.2647	0.1711	0.8924	0.6218
$P$	$L2$	0.3460	0.5231	0.1248	0.0402	1.0000	-
$P$	$L3$	0.6598	1.0000	0.4932	0.1267	-	-

表4 评价标准

相对权重	评价
1 ~ 0.90	很大
0.90~ 0.65	大
0.65~ 0.35	中
0.35~ 0.10	小
0.10~ 0	微弱

地裂与地震有一定的关系,但相对大地构造运动来说,对西安地裂的影响较小。而数据本构的计算分析结果也恰恰说明了这一点。在已发表的文章资料中,几乎一致认为过量抽取地下承压水将会导致沉降区边缘出现环状、高角度、倾向沉降中心的正断层式的张破裂。实测资料也说明地裂活动的强度与抽汲地下承压水的关系最为密切。因此认为西安地裂的主要部分是由于过量抽汲地下承压水引起地面不均匀沉降运动所产生。通过对实测资料的数据本构计算分析表明,开采地下承压水位水量  $Q$  对地裂的影响约占总量的40%~70%,这一结论与上述分析和实际观测结果一致。事实上,西安地裂的致裂成因并非哪一种因素所致,而是多种因素的迭加效应。总之,西安地裂缝活动是内外动力地质作用和人类工程活动(非构造因素)的共同产物。自然地质作用是内因,人类工程活动是外因。

数据本构分析以其准确可靠的分析结论对西安地裂成因进行了定量的分析讨论,在计算分析中是将各主要影响因素同等地位地参与分析。它为许多不确定问题和多因素影响问题的分析讨论提供了一种较好的分析手段。

#### 4 地质灾害问题的数据本构分析预测

地质灾害活动预测,实质是作用环境与作用因素对地质灾害发展的影响进程研究。通过工程地质测绘、监测和历史资料,鉴别地质环境条件和因素之间的相互关系,建立起它们之间的空间展布规律及其时间演化特征。由于地质灾害成因的复杂性,使得传统方法预测变得十分困难。为此,我们应用数据本构分析方法,将各种已知的影响因素等水平地纳入建模分析研究之中,使预测模型最大限度地融合各种致灾因素,更全面地研究地质灾害的时空规律。

数据本构分析预测的实施程序大致如下:

- a. 搜集资料,确定可能导致某种地质灾害的各种因素;
- b. 对描述各种致灾因素的数据信息进行归类;
- c. 确定分析的目标量和考察因子;
- d. 根据讨论问题的目的需要,设计一种或几种考察方案;
- e. 数据本构计算分析处理,定量判断数据信息的粗糙程度;
- f. 数据本构计算分析检验预测偏差;
- g. 数据本构分析预测。

上海市的地面沉降从1921年开始出现,到1965年沉降中心区的最大累积沉降量已达2.63 m。自1952年以来对上海市的地面沉降进行了大规模的研究工作,提出“大量开采地下水是引起地面沉降的主要因素”。而后开展的控制开采和大面积回灌水对控制上海市地面沉降起到了重要作用。但是如何安全、经济、合理地开发利用地下水和进行人工回灌水,采、灌地下水对地面升降运动的影响怎样等问题还有待进一步探讨和研究。

我们首先运用数据本构分析方法,从1949年~1976年的观测资料<sup>[11]</sup>中抽取了5种考察因子,如表5所列,对上海市地面沉降成因进行了分析,得出开采地下水量  $Q_k$  对上海市的地面沉降  $s$  以及地下水位埋深  $H$  有非常大的影响,其次是回灌水量  $Q_g$ 。这一结论与六七十年代上海市基建委和国家地质部组织进行的大规模“上海地面沉降问题研究”得出的结论完全一致。且后者是通过专家系统的“定性”分析得出的结论,而我们是运用数据本构分析,通过计算机计算

得到的“定量”分析结论。

在分析确定影响地面升降运动的主要成因后,将  $Q_k$  和  $Q_g$  作为预测影响因子,对上海市的年平均沉降量  $S$  进行了预测分析。

由资源信息<sup>[11]</sup>建立沉降量  $S$  与开采量  $Q_k$  和回灌水量  $Q_g$  之间关系的数据本构模型为

$$S = S^* + \sum_{m=1}^3 B_m F_m [a_m^{(1)} Q_k + a_m^{(2)} Q_g] \quad (1)$$

其中:  $S^* = -3.7557$ ,  $B_1 = 0.9330$   $B_2 = 0.2059$   $B_3 = 0.1224$

若令  $a_m = (a_m^{(1)}, a_m^{(2)})$

则  $a_1^T = (-0.61465, -0.7888)$   $a_2^T = (0.1627, 0.9867)$   $a_3^T = (0.05997, 0.9982)$

$F_m$  是投影  $[a_m^{(1)} Q_k + a_m^{(2)} Q_g]$  的平滑函数(即岭函数),它由数据库来描述。这三个岭函数的形式如图1所示,图中  $F$  表示岭函数,  $T$  表示投影方向。

根据预测需要,又设计了开采水量  $Q_k$  分别为0, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 15000和20000,以及回灌水量  $Q_g$  为0, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 15000和20000的不同组合,对沉降量  $S$  进行预测,得到不同  $Q_k$  和  $Q_g$  情况下的  $S$  等值线图(图2)。由图2分析表明,如果目前既不开采也不回灌水,则地面仍将以大约年平均4.67 mm 的速率下沉,这反映了沉降具有一定的滞后性。对预测信息的分析表明,上海市的地下水开采总量应控制在年平均1000~1500万 t 以下,回灌水量应保持在年平均500~1000万 t 左右,这样较经济合理。地下水的最大开采量不宜超过年平均2000万 t,否则会造成巨大的地面沉降。另外,为了控制地面的滞后沉降,即使不开采地下水,每年也应回灌500~1000万 t 水。

数据本构计算分析表明,资源数据信息的粗糙度为0.7(其范围为0.01~0.99,值越小数据越精细),较为粗糙。

对数据本构建立的模型本身进行考察表明,误差较小(表6)。若资源数据信息丰富一些,则预测结果将会提高。即使如此,用数据本构分析预测仍然能够得到较满意的结论。

表5 五种考察因子

代符	意 义
$S$	地面升降量(mm)
$H$	地下水位埋深(m)
$T$	年代
$Q_k$	年平均开采水量(万 t)
$Q_g$	年平均回灌水量(万 t)

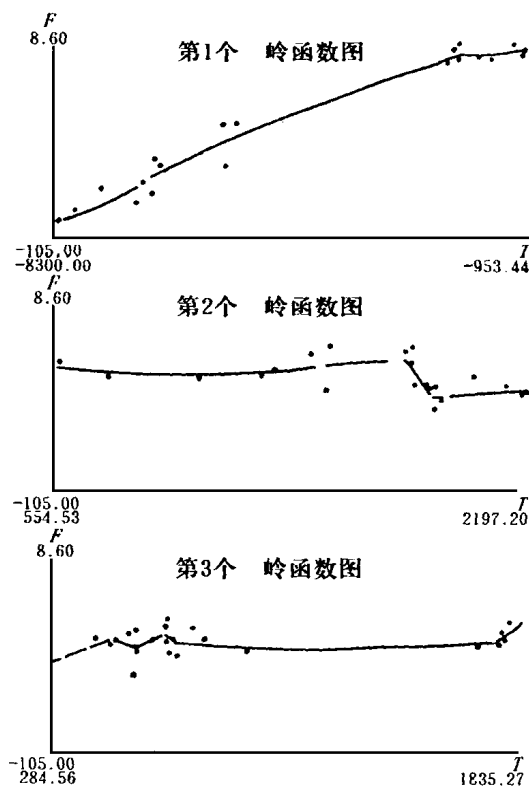


图1 岭函数图

表6 模型误差分析

升降量		水位埋深	
绝对误差 (mm)	占数据总 数的百分 比 (%)	绝对误差 (m)	占数据总 数的百分 比 (%)
小于10	96.43	小于10	99.74
小于5	71.43	小于5	89.47
小于2	42.86	小于2	63.16
小于1	35.71	小于1	57.89

由上述可见, 尽管资源数据信息较粗糙, 但是通过数据本构分析预测仍然能够得到较好的预测结果。这里选取的影响因子只有两个(即  $Q_k$  和  $Q_s$ )。实际上在建模中, 对影响因子的数量没有限制。因此, 对多因素影响问题只要资源数据齐备, 均可建模预测。这种等水平考虑多因素的预测, 对诸如地质灾害问题这类复杂大系统的预测分析具有重要的意义。

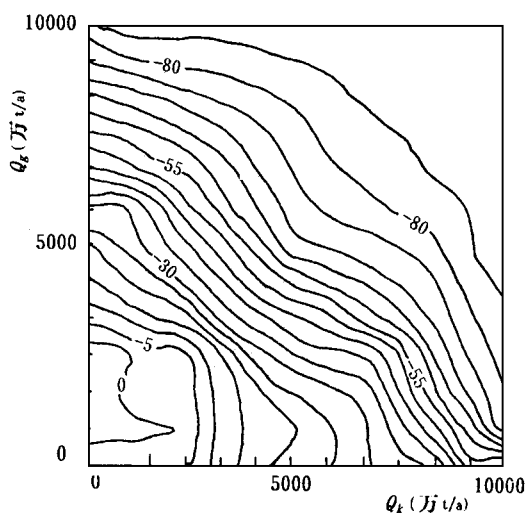


图2 升降量等值线图

## 5 结语

(1) 西安地裂成因数据本构计算分析表明, 导致地裂活动的主要部分是过量抽汲地下承压水, 其次是大地构造运动, 地震对地裂活动的影响相对小些。三者对西安地裂活动影响的比率约为55:30:15。从本质上来说, 只要存在大地构造运动, 西安地裂就不可避免。只是通过人为的合理活动, 可以减轻地裂的活动强度, 使地裂灾害降到最低限度。从西安地裂的内因上来看, 只要渭河盆地存在有大地构造活动, 西安地裂就不可避免。从外因上来看, 人为合理地控制开采地下承压水, 就能够使西安地裂的活动强度保持在较低的水平, 从而使地裂造成的灾害损失降到最低限度。

(2) 数据本构计算分析在充分尊重资源信息的基础上给出定量的分析结果, 而已往对该类问题的研究大多是通过专家系统给出定性的分析结果。这也是众多研究者对“开采承压水和大地构造运动两者中哪个对西安地裂的影响最大?”一直存在着争议的客观原因。从数据本构计算分析可见, 此三者对地裂影响水平相差不是很大。诸如此类的问题, 用定性分析很难评判。而数据本构分析恰恰克服了这一弱点。

(3) 数据本构预测分析在建模的过程中是将各主要影响因素等水平地参与分析。而已往对该类问题的研究大多是将多因素问题首先分为若干个低维问题进行讨论, 而后再进行组装, 这样显然不能很好地考虑各个因素之间的交互作用, 以及它们对总体的综合影响。数据本构分析方法较好地解决了多因素影响下的模拟、预测分析问题, 使复杂大系统问题的解决有了很好的分析处理手段。

(4) 数据本构分析对于分析研究多因素影响复杂问题, 并将实际问题上升到理论高度, 以及进行灾害分析都具有重要的意义。此外, 数据本构分析还能够大致判断各量之间的直接或间接关联效应。这对一些物理意义不很明确的量寻求合理的解释具有很好的指导意义。

数据本构分析是一种新的分析方法, 无人工修饰, 完全是由计算机自动搜寻资源信息的内在隐性结构规律, 它更能反映问题的本质特性。由于这种方法还处于雏型研究阶段, 因此还需要通过各种问题的检验和论证来完善。

### 参 考 文 献

- 1 王园等. 材料本构的数据描述方法. 见:《现代力学与科技进步》. 北京: 清华大学出版社, 1997-08
- 2 王园等. 固体材料的数据本构研究. 新疆师范大学学报(自然科学), 1995, 14(2)
- 3 王园等. 西安地区地面沉降灾害问题的数据本构分析. 见:《工程地质——面向21世纪》. 北京: 中国地质大学出版社, 1997-10
- 4 王园等. 上海市地面沉降灾害的数据本构预测分析. 中国地质灾害与防治学报, 1997, (3)
- 5 王园等. 勘察数据可靠性的数据本构分析评价. 地质与勘察, 1998年(待刊)
- 6 王园等. 西安地裂灾害问题数据本构分析. 西安地质学院学报, 1998年(待刊)
- 7 王园等. 11种微量元素与肛肠疾病发病率关系的 DCA 研究. 中国中青年中医论丛. 北京: 中国科学技术出版社, 1996-05. 北京: 中国中医药学会
- 8 李永善等编著. 西安地裂及渭河盆地活断层研究. 北京: 地震出版社, 1992-09
- 9 张家明主编. 西安地裂缝研究. 西安: 西北大学出版社, 1990-66
- 10 陕西省地质矿产局. 西安地区区域地壳稳定性与地质灾害评价和研究. 1990(内部资料)
- 11 上海市地质处. 上海市地面沉降勘察研究报告(1962~ 1976年), 1976-02

## DATA CONSTITUTIVE ANALYSIS OF GEOLOGICAL HAZARD

Wang Yuan

Wang Q in

Zheng Zhuguo

(China University of Geosciences) (Shanghai Jiao Tong University) (Xinjiang Agricultural University)

### ABSTRACT

In this paper, taking the surface subsidence hazard in Shanghai and the ground fractures hazard in Xian as examples, the method and procedure and the significance of the data constitutive analysis for geological hazard are expounded.

**KEY WORDS:** Geological hazard Data constitutive analysis