

# 中国区域地壳稳定性编图研究

李 晓 易明初 王连庆 乔子江

(中国地质科学院地质力学研究所)

**摘 要** 中国区域地壳稳定性评价图,是根据“安全岛”理论,采用网格划分,逐层应用模糊综合评判和图象识别,以及区域地壳稳定性评价专家系统的步骤和方法编制完成的。该图预测评价的极不稳定区和极次不稳定区,已被近期在中国云南孟连、甘肃永登两地分别发生的中、强地震震中定位所证实。因此,介绍区域地壳稳定性评价的定量化编图理论和方法以及它在实际应用中的作用和意义,即是本文阐述的重点内容。

**关键词** 中国区域地壳稳定性编图 模糊综合评判 图象识别 专家系统

## 0 引言

区域地壳稳定性研究是我国工程地质学界,在 50 年代末和 60 年代初,为重大水利工程布局和建设进行区域工程地质问题调查时,提出的新的学术概念和研究领域。经过近 30 余年的发展,区域地壳稳定性研究为国家重大水利工程建设、核电站选址、复杂地质条件下铁路和公路的选线,以及高层建筑或地下工程的地壳稳定性评价做出了重要贡献。围绕上述不同类型工程地区地壳稳定性的论证,相应编制了一系列不同比例尺的区域地壳稳定性评价图。这些区域地壳稳定性评价图的编制,从早期定性评价发展到现今定量化评价,采用系统的、多因素多层次的综合评判研究思路,深化了区域地壳稳定性的研究,从更大的视野角度,全面地为国家国土的合理开发利用,工程建设布局,减轻地质灾害影响,以及估算保险赔偿等方面提供了重要的科学依据。

## 1 区域地壳稳定性编图研究概况

中国的区域地壳稳定性编图研究大致经历了三个阶段。第一个阶段大致是从 70 年代末至 80 年代初。在区域地壳稳定性研究由萌芽阶段发展到理论形成阶段的同时,为满足国家对大江、大河流域治理和规划的要求,区域地壳稳定性编图也逐渐被提到环境地质研究的研究中来,在这个阶段,区域地壳稳定性编图基本上处于理论探索阶段,评价因素选择较单一,评价方法主要以定性描述和定性分析为主。

进入 80 年代中期,随着区域地壳稳定性研究在工程实践中不断地深入,引进和接受一些新理论和新方法。如计算机技术的初步应用,使编图发展到评价因素指标化,综合评判定量化

的阶段。其特点是稳定性编图已不再局限于定性分析和描述,而是能够适当应用一些数理和数量化的综合评判方法参与稳定性评价。这其中主要采用的有:模糊数学综合评判法、模式识别(图象识别)、逻辑信息法和灰色系统预测理论等。尽管这个时期的定量化评判还停留在单模型、单层次、定量与定性相结合的研究阶段,但无疑已为区域地壳稳定性编图,由定性向量化发展打下了坚实的基础。

90年代区域地壳稳定性编图研究发展到第三阶段。这个阶段已具备由单模型、单层次评价,向多层次、多变量、智能化、计算机化进行区域地壳稳定性编图的技术力量。但是,由于经过40多年的建设,我国易于开发而区域上又很稳定的工程场址越来越少。全国450个大型城市中经统计,位于地震基本裂度Ⅶ和Ⅶ以上的地区占50%以上。因此,提高稳定性评价精度,尽可能在次不稳定地区或不稳定地区中寻找相对稳定的“安全岛”,就成为现今区域地壳稳定性编图的重要研究方向。

中国区域地壳稳定性评价图(1:500万)<sup>①</sup>的编制,正是根据“安全岛”的理论,以系统的整体观,采用网格划分法和逐层深入地定量化评价,突破了以往编图按稳定、基本稳定、次不稳定、不稳定四级划分的框框,对次不稳定区和不稳定地区,应用图象识别的方法,完成了相对“优”与“劣”的评价和重点工程地区区域稳定专家系统评价。这种评价反映了当今区域地壳稳定性编图的最新研究思路,并采用了逐层深入的定量化的评价方法。

## 2 中国区域稳定性编图的思路和技术方法

当今区域地壳稳定性编图,面对可供选择的稳定性工程场址越来越少的挑战。因此,在编中国区域地壳稳定性评价图的初始,就把李四光教授(1967)《论地震》一书中指出的:“在一些活动构造带中,也是有相对安全的地区(又叫安全岛)”作为编图的指导思想。虽然“安全岛”的思想,在近年来重大工程地质环境评价中,越来越多地得到重视。胡海涛教授(1979、1994)多次强调过鉴别相对稳定地(岩)块——“安全岛”的7或9条标准,刘传正博士也提出了“重大工程选址的‘安全岛’多级逼近与优选理论”。但真正应用该理论在全国范围内对相对稳定地(岩)块(即“安全岛”)的识别,是在本图采用“网格划分逐层评价法”和分单元进行区域地壳稳定性评价之后才得以实现的。

这种“网格划分逐层评价”的方法(图1),是依据对一个复杂巨系统的研究可分解为有限的、较小的众多子系统研究的观点。把全国960万平方公里国土内的区域地壳稳定性评价问题,按 $100\times 100\text{km}$ 和 $50\times 50\text{km}$ 两种尺度,分解成二个层次,近2000个小的单元来研究。并且考虑影响地壳稳定性的7类地质因素:(1)地壳结构;(2)断裂活动;(3)重力场;(4)地热场;(5)地应力场;(6)地形变;(7)地震活动、外动力地质灾害。相应地建立了第一层次模糊综合评判“中国区域地壳稳定性模糊综合评判分级指标”(表1),以及第二层次次不稳定区和不稳定区图象识别特性(表2)。

根据上述稳定性评价分级指标,从每一个小单元中,提取参与稳定性综合评判的指标数据,输入区域稳定评价数据库。第一个层次应用了模糊数学“加权平均”的综合评判法;第二个层次针对第一个层次评价得出的次不稳定区和不稳定区,利用图象识别理论中固定增量逐次调整的分类法;而第三个层次评价,则仅限于目前国家一些重点工程建设地区。如:长江三峡水

<sup>①</sup> 中国地质科学院地质力学研究所区域稳定性编图组,1:500万中国区域地壳稳定性图说明书(初稿),1994。

表 1 中国区域地壳稳定性模糊综合评判分级指标

Table 1 Rating index of fuzzy synthetic judgement of regional crustal stability in China

| 因素选择       | 单元性状                                      | 构造特征  | 垂直地形变  | 地壳厚度变异及布格重力异常  | 震级                                   | 烈度(I)                | 地质灾害                     |
|------------|---|---|--|--|--------------------------------------|----------------------|--------------------------|
| 稳定等级       |   |   |  |  |                                      |                      |                          |
| 稳定 (I)     | 均质完整的岩体, 或前寒武古老地块, 断裂不发育, 块状结构            | 区内断裂稀疏, 无活动断裂                               | 相对差异升降 $\leq 1\text{mm/a}$                                     | 地壳界面平缓, 莫氏面起伏 $< 2\text{km}/100\text{km}$ , 布格重力梯度值 $< 50\text{mGal}/100\text{km}$ | 无震或仅有 $M_s < 5.0$ 级地震                | $I < VI$             | 物理地质现象不明显                |
| 基本稳定 (II)  | 中生界盆地和古生界沉积建造区, 区内完整性较好, 无较大断裂            | 断裂具多次活动, 但现今活动不明显地区                         | 等值线平缓, 相对差异升降 $1\text{mm/a} < V \leq 2\text{mm/a}$             | 莫氏面起伏 $2-4\text{km}/100\text{km}$ , 布格重力异常达 $50-100\text{mGal}/100\text{km}$       | $5.0 \leq M_s < 6.0$ 或为 6.0 级地震邻区    | $VI \leq I \leq VII$ | 地面沉降严重, 或地裂缝、岩溶塌陷较为严重    |
| 次不稳定 (III) | 中生界和古生界沉积区, 区内完整性差, 或为新生界沉积区, 镶嵌结构        | 断裂密度较大, 长期多次活动, 且现今活动性中强                    | 等值线呈梯度分布, 主体位于相对差异升降 $2\text{mm/a} < V \leq 3\text{mm/a}$ 的梯度带 | 莫氏面起伏 $4-8\text{km}/100\text{km}$ , 布格重力异常达 $100-150\text{mGal}/100\text{km}$      | $6.0 \leq M_s \leq 7.0$ 或为 7.0 级地震邻区 | $I = VII$            | 地裂缝或岩溶塌陷严重区, 崩、滑、流灾害较严重区 |
| 不稳定 (IV)   | 断裂挤压破碎带、褶皱带或拗褶区, 新生代大陆裂谷和复合裂谷, 地壳破碎, 块裂结构 | 断裂密度大, 长期多次活动, 长度大于 $100\text{km}$ , 现今活动强烈 | 等值线密集扭曲, 主体位于相对差异升降 $\geq 4\text{mm/a}$ 的梯度带                   | 莫氏面起伏 $> 8\text{km}/100\text{km}$ , 布格重力异常 $> 150\text{mGal}/100\text{km}$         | $M_s > 7.0$ 级                        | $I \geq VIII$        | 崩、滑、流灾害频繁发生区             |

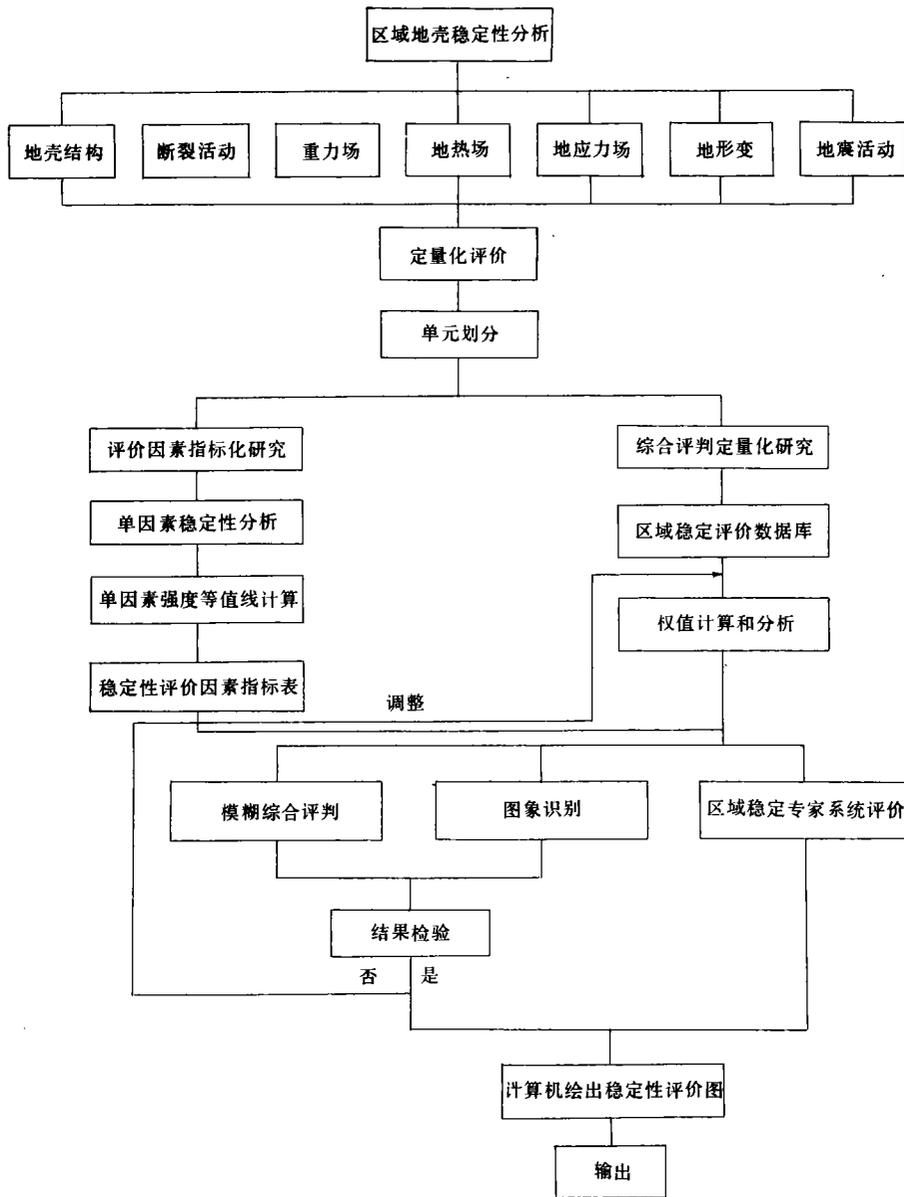


图 1 区域地壳稳定性量化评价流程图

Fig. 1 Flow chart showing the quantitative evaluation of regional crustal stability

利工程区,广东大亚湾核电站厂址区,以及福建马尾经济开发区等。应用殷跃平博士(1992)开发的“智能型”区域地壳稳定性评价专家系统(CRUSTAB)进行评价。这种逐层深入、网格划分、多变量、多因素、数值模拟的区域地壳稳定性量化评价编图,就使得该图得出的评价结果,相对同等比例尺图件来讲,对于国土规划和工程建设更具实用意义。

表 2 次不稳定区图象识别特性提取表

Table 2 Characteristics of pattern recognition of subunstable region

|  |  |
|--|--|
| X1 是否为新生代断陷盆地                              | X6 是否处于重力异常部位。如:梯度带、重力高或重力低等值线边缘或挠曲部位  |
| X2 是否存在现今中等强烈活动断裂                          | X7 是否存在地温梯度带或地温梯度呈线性分布                 |
| X3 是否位于断裂端点、拐点、交汇或汇而不交的部位                  | X8 是否位于环境剪应力值大于 10MPa 地区               |
| X4 主要断层与主压应力叠加角是否为 $25^{\circ}-50^{\circ}$ | X9 是否发生过 $M_s \geq 6.0$ 级地震            |
| X5 是否形变等值线密集,位于显著差异升降扭曲部位                  | X10 离最近的 $M_s \geq 6.0$ 级地震距离是否小于 30km |

### 3 中国区域稳定性量化编图成果

在初编了活动构造及地(岩)块图,现代地壳形变及震源机制图,重力、航磁和地热、温泉分布图,以及地震、地质灾害等图的基础之上,中国区域地壳稳定性评价编图根据上述量化编图原则和具体步骤,首先把全国划分为 1000 个左右研究单元,用模糊综合评判模型,考虑 4 种稳定级别,7 类地质因素(表 1),进行了第一层次的地壳稳定性评价,得到了按稳定、基本稳定、次不稳定和不稳定 4 种稳定级别划分的全国区域地壳稳定性第一层次评价结果,并由计算机差分绘出了稳定性评价等值线图(图 2)。由图 2 统计看出,全国国土面积的 24% 是属于稳定地区,56% 属于基本稳定地区,17% 属于次不稳定地区,而不稳定地区面积仅占国土总面积的 3%。这说明中国全区 80% 以上是属于相对稳定的地区,作为一个整体,可相对看成一个大的、稳定的“安全岛”;但若以活动构造体系控制的活动构造带,以及它们夹持的相对稳定地(岩)块进行划分,中国全区又可分为一个个地理位置、地壳结构不同,构造活动、地震活动、地壳稳定程度各异的大区或块体。这其中按地壳稳定程度划分,不稳定区主要特征是:该区断裂活动和地震活动较强,一般发生过 7 级以上地震,地震基本烈度  $\geq \text{IX}$ ;次不稳定区分布形状和展布规律,主要受现今大的、活动构造体系控制,不是简单地根据震级单因素分区;而稳定地区范围主要受地(岩)块的控制,这些地(岩)块的边界和中生代盆地边界,也有着极好对应。

再应用图象识别原理对上述次不稳定区和不稳定区进行第二层次地壳稳定性评价。按  $50 \times 50\text{km}$  划细单元,考虑 10 种地质指标(表 2),进行区域地壳稳定性图象识别分析。该层次共计识别出 430 个次不稳定单元,即稳定程度相对好一些的地区;270 个极次不稳定单元,即稳定程度比次不稳定差,但又达不到不稳定程度的地区;40 个不稳定单元和 76 个极不稳定单元。这些极次、极不稳定单元的稳定性识别,使得次不稳定区和不稳定区的评价结果,不再象以往编图简单地划分为一大片地区,由于单元划细,其结果也就更加精细。这种在以往稳定性编图评价结果基础之上,再深入一层的多层次区域地壳稳定性研究,使区域地壳稳定性评价结果也呈现出明显的分段、分区性。象鄂尔多斯周缘次不稳定区,受活动断裂的展布和地震活动强弱控制,次不稳定区和极次不稳定区的相间分布,以及沿 NEE 向的阿尔金断裂两端属极次不稳定区,中部地壳活动相对较弱,属次不稳定区的评价结果都说明了这个问题。

此外,由于进行了第二层次图象识别,极大地提高了稳定性评价的精确程度。今年 7 月分别发生在云南中缅边界孟连 7.3 级地震和甘肃永登 5.8 级地震实例检验分析,说明中国区域地壳稳定性评价编图的结果与实际情况有着惊人的吻合之处。中国区域地壳稳定性评价图显示,云南孟连 7.3 级地震区,正位于稳定性评价得出的极不稳定区内,其半径误差不超过

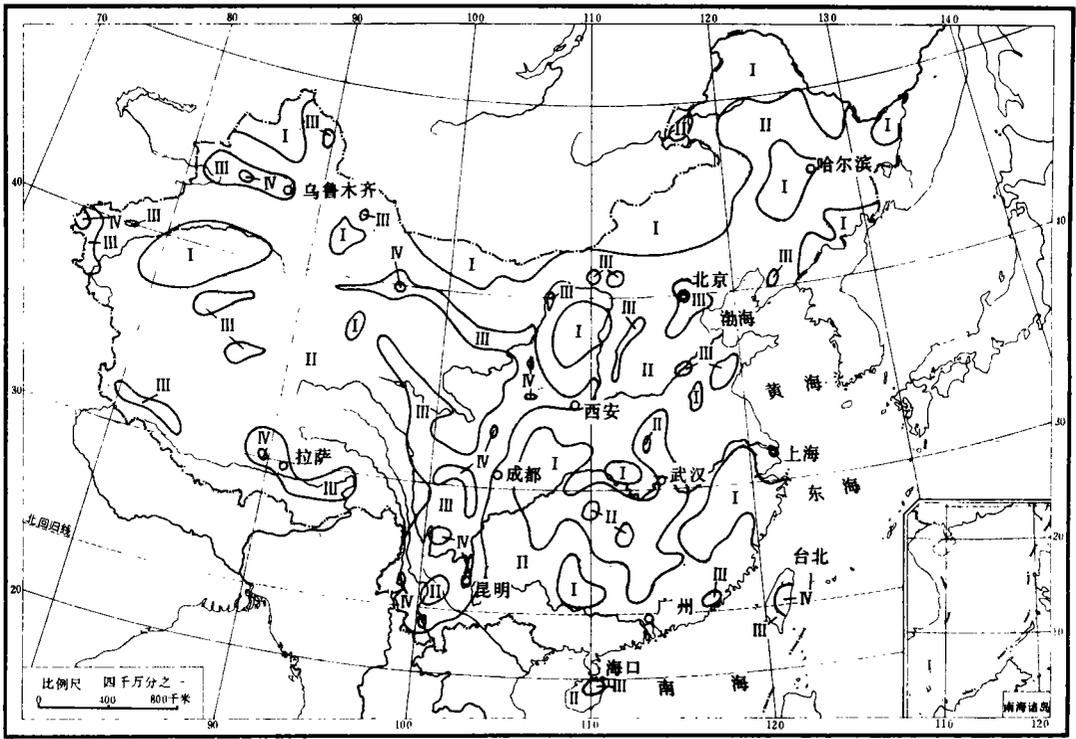


图2 中国区域地壳稳定性评价略图

Fig. 2 General sketch showing the evaluation of regional crustal stability of China

I. 稳定区; II. 基本稳定区; III. 次不稳定区; IV. 不稳定区

50km,而周围地区地壳稳定性评价则属于次不稳定区和基本稳定区。同样,甘肃永登5.8级地震恰好位于极次不稳定区内,周围稳定程度同样偏于稳定,为次不稳定区和基本稳定区,误差半径不超过25km。

#### 4 结论和展望

根据“安全岛”理论,多变量、多元化、逐层深入、数值模拟综合评价而编制完成的中国区域地壳稳定性评价图(1:500万),不仅在理论上和方法上展现了当今中国区域地壳稳定性编图研究的较高水平,而且对中国区域地壳稳定程度的实际评价,也得出了基本令人信服的准确的评价结果。这个结果在某种程度上,对国家重大工程选择相对稳定地质环境起到了决策作用。由于人类活动受到政治、经济、资源和人口的多重因素的限制和影响,现今中国经济发展由东部地壳稳定区和基本稳定区向西部转移,在西部次不稳定区和不稳定区,将要建设大型现代化城市,开发水利、核电资源,发展一系列大型工业、企业,已成为今后中国经济发展的重要动向。因此,深入地评价活动构造区内地壳的稳定程度,为工程设计部门提供明确规范的地壳稳定性评价参数,要求区域地壳稳定性编图研究亟待解决以下问题:1)区域地壳稳定性编图提供的稳定性指标参数的适用性、规范性、精确性问题;2)制约区域地壳稳定性的动力学机制问题;3)计算机编图的动态模拟系统研究。这些问题的提出,对今后区域地壳稳定性编图是一次挑战,同时对其发展也是一次极好的促进和机遇。

## 参 考 文 献

- 1 李四光,论地震。北京:地质出版社,1979。
- 2 陈庆宣、孙叶等,运用地质力学方法研究区域地壳稳定性。地质力学文集(9),北京:地质出版社,1989。
- 3 胡海涛、易明初等,广东核电站规划选址区域地壳稳定性分析与评价。北京:档案出版社,1988。
- 4 李兴唐、许兵等,区域地壳稳定性研究理论和方法。北京:地质出版社,1987。
- 5 殷跃平、胡海涛等,重大工程选址区域地壳稳定性评价专家系统(CRUSTAB)。北京:地震出版社,1992。
- 6 刘传正、胡海涛,工程选址的“安全岛”多级逼近与优选理论。中国地质灾害与防治学报(4),1993。
- 7 易明初、李晓,燕山地区喜马拉雅运动及现今地壳稳定性研究。北京:地震出版社,1991。
- 8 李晓、肖树棠,图象识别法在长江三峡工程地区区域地壳稳定性分区评价图编制中的应用(见:长江三峡工程库区地质环境与环境地质研究)。成都:成都科技大学出版社,1992。

## A NOTE ON THE COMPILATION OF MAP OF CRUSTAL STABILITY ZONATION IN CHINA

Li Xiao Yi Mingchu Wang Lianqing Qiao Zijing

(*Institute of Geomechanics, CAGS*)

**Abstract** Following the idea of “Safety Island” the crustal stability zonation map of China (1:5000000) is first compiled on a grid basis in different steps using fuzzy synthetic judgement, image recognition and an expert appraisal system.

A strong earthquake and another moderately strong shock have recently been reported to occur in Menglian county of Yunnan province and Yongdeng county of Gansu province indicated as unstable and fairly unstable regions on the map. It is therefore emphasized that a tentative quantification of the evaluation of regional crustal stability proves significant in practical applications.

**Key words** crustal stability zonation in China, fuzzy synthetic judgement, image recognition, expert appraisal system.

### 第一作者简介

李晓,男,35岁,副研究员。1983年毕业于华北水利水电学院工程地质及水文地质专业,主要从事区域地壳稳定性和新构造研究。通讯地址:北京市海淀区民族学院南路11号地质力学研究所。邮政编码:100081。