

文章编号：1006-6616(2001)02-0097-07

# 区域地壳稳定性评价的“安全岛” 理论及方法

胡海涛

(国土资源部水文地质工程地质勘查院, 北京 100081)

**摘要：**本文通过历史强地震极震区内存在弱破坏现象的回顾，论述了李四光教授提出的“安全岛”概念，认为这种地壳构造上属活动性相对稳定的地块或岩块在重大工程选址上具有重要的意义。文中提出了地壳稳定性分级和分级的主要指标，把稳定性分为4级：稳定（Ⅰ）；次稳定（Ⅱ）；次不稳定（Ⅲ）；不稳定（Ⅳ）。这些定性和半定量分级指标可作为工程建设地区地壳稳定性评价的依据。

**关键词：**安全岛；地壳稳定性

中图分类号：TU457

文献标识码：A

## 1 “安全岛”的提出和概念

区域地壳稳定性是指工程建设地区，在内、外动力（以内力为主）的综合作用下，现今地壳及其表层的相对稳定程度，以及这种稳定程度与工程建筑之间的相互作用和影响<sup>[1]</sup>。研究区域地壳稳定性的目的，是为了选择相对稳定的地区作为工程建设的基地和场址。六七十年代，李四光教授<sup>[2]</sup>曾提出在活动构造带内选择相对稳定的“安全岛”作为工程建设基地和场址的重要论点。这一论点已被较多事实所验证，如1920年宁夏海源8.5级大震，在震中区内出现烈度Ⅶ度的地方，如极震区中的袁家窝窝，清朝同治年间所掘的土窿口处仅有轻微的破坏，相当于烈度Ⅷ度；又如1976年7月28日唐山7.9级大震，在极震区中存在烈度Ⅵ度区，房屋震害率仅30%~40%；更令人注目的是位于极震区内的凤凰山顶的亭阁建筑物，震后仍巍然屹立，未遇破坏。这种高烈度地区，出现低烈度异常，如果不是由于建筑物本身材料、结构因素所左右，而仅仅是地基岩（土）体介质、结构因素的影响，可以认为这就是相对稳定的“安全岛”。反之，在低烈度地区出现高烈度异常，则可称之为“危险区”。如距唐山市约60余公里的乐亭县滨海地区烈度等震线不超过Ⅶ度，但发生了地陷、地滑和地裂等一系列严重震害。

20年来，“安全岛”——相对稳定地块选择已成为我国重大工程选址，进行地震地质和

区域地壳稳定性评价工作的一种指导思想,并在多处重大工程如青藏铁路、广东大亚湾核电站、长江三峡工程和黄河黑山峡水利枢纽工程规划选址中得到广泛的应用。

组成地壳的基本结构,按李四光教授划分不外乎地块、岩块和褶皱带和断裂带<sup>[3]</sup>;所谓地块、岩块是指褶皱带或断裂带间扶持的大小块体,大面积的稳定块体可称为地盾或地台。相对而言,褶皱带是比较活动的,而地块、岩块是比较稳定的,但必须结合地质发展史加以分析。某时期的褶皱带经后期地质作用之后可能演化为僵化或半僵化的地块,如长江三峡地区的黄陵地块;而相对稳定的地(岩)块也可能在新构造运动之后,全部或部分转化为一定形式的构造和地震带(或称为活化)如云南龙陵岩块。这种地壳稳定性与活动性的相互转化关系是一定地质历史时期地壳演化过程所决定的。因此,研究现今时期或预测将来地壳的稳定性,不能忽视地质发展历史的研究。“安全岛”和“危险区”也不是一成不变的。

## 2 区域稳定性研究的思路和内容

地球表面可分海洋和大陆两大部分,大陆和海洋又可划分为若干构造单元,不同构造单元又具有不同特征和稳定性,这种稳定性仅为最基础的构造稳定性,尚缺乏地震稳定性、物理地质作用和人类工程活动对稳定性的影响。因此,必须首先在研究构造稳定性的基础上,研究其它稳定性问题,其总体稳定性,称之为区域地壳稳定性(简称区域稳定性)。

区域地壳稳定性,具有一定的研究范围,其边界经常是以区域构造单元周边的活动断裂作为边界,也可以是地层、岩性间的接触面诸如假整合、不整合及岩浆岩侵入接触面等,如两种界面都存在的地(岩)块,且活动断裂分布于地层,岩性接触界面的外圈,对界面围限的中间地(岩)块的抗震性能和稳定性是有利的。单纯活动断裂围限的地(岩)块(或称断块),当周边断裂活动速率较高,且地(岩)块面积较小时,往往成为不稳定的地块。前者如长江三峡的黄陵地块,后者如云南的龙陵岩块。另外,稳定性与地(岩)块的介质、结构和地(岩)块的大小、形态均有着密切的关系。

研究区域稳定性不能脱离工程建筑类型和规模,不同类型和规模的工程,对于不同地壳稳定性的适应性能是不完全相同的,而不同地壳稳定性所造成的地质环境,对于不同类型和规模的工程建筑具有不同的反馈性;适应性强者,常产生正向反馈效应,使工程取得技术、经济和安全的良好效益。反之,不仅技术经济和安全得不到应有的设计效益,而且会使工程遭受失败,或产生久治难愈的病害工程。

另外,在研究区域稳定性时还不能忽视外动力的影响,特别是人为动力所带来的区域影响,如大面积过量抽汲地下水或液体矿引起地面沉降和塌陷;水库蓄水、采矿诱发地震,以及大规模的开挖、填土和爆破工程等,都应该是区域稳定性研究的范畴。

根据以上思路,笔者在广东大亚湾核电站区域稳定性评价中总结出区域稳定性分析评价的系统内容,方法和步骤(图1)。

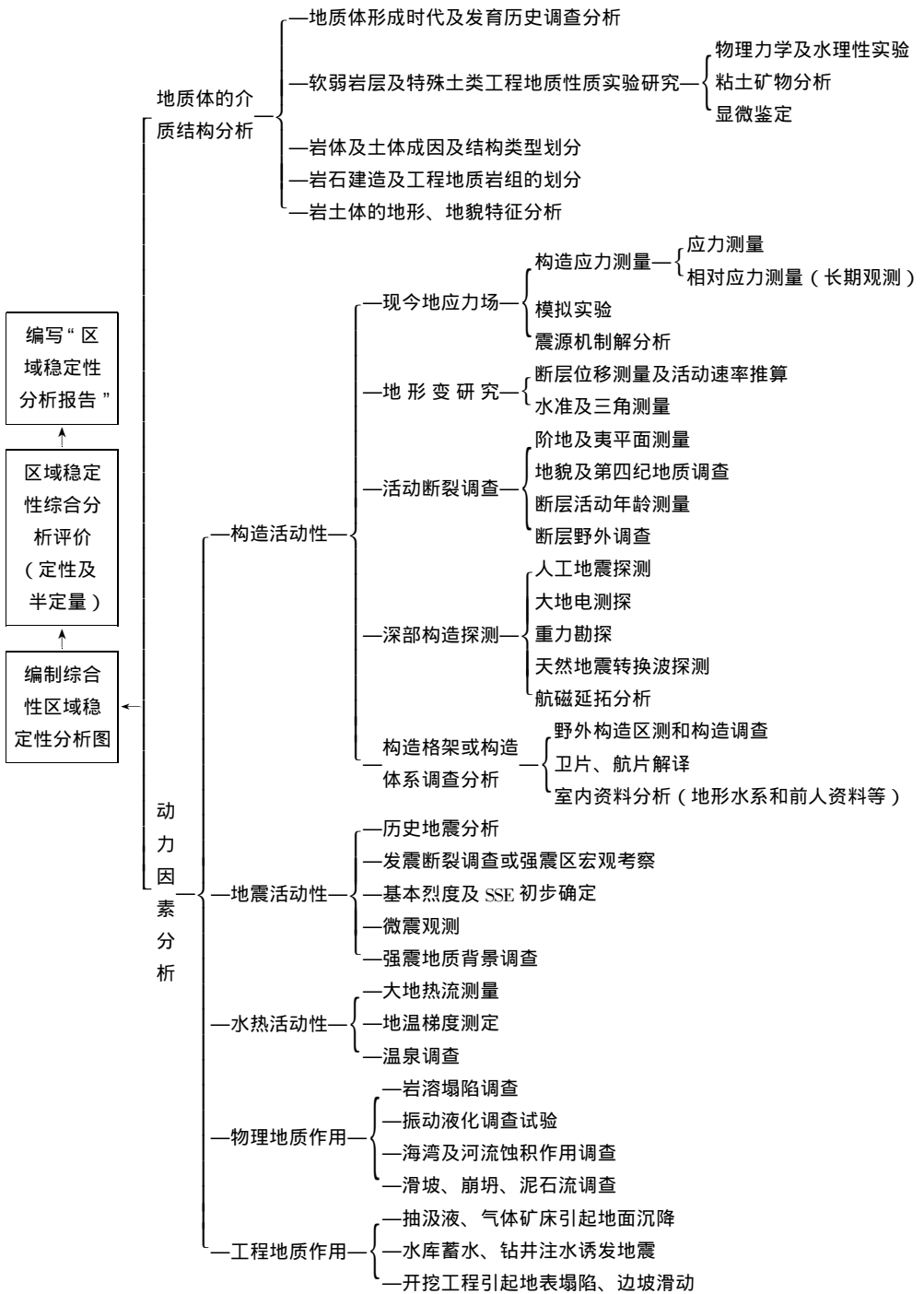


图 1 区域稳定性分析、评价的方法、内容和步骤图<sup>[6]</sup>

Fig.1 The procedures and methods for evaluation of regional crust stability  
(据广东核电站区域稳定性分析评价报告, 1986)

### 3 区域地壳稳定性评价的主要方法

区域地壳稳定性评价方法大致可分以下几种：

#### 3.1 区域地壳稳定性主要指标评价法

此种方法是在搜集控制现代活动性的地质、地震和地球物理现象的活动指标，如大地构造特征、第四纪升降运动速率、断裂活动性（包括绝对活动年龄和活动速率）；地应力（主压应力方向与主断层走向的迭加角）地震（最大震级和基本烈度等）地球物理参数（如大地热流值、布格异常梯度值等）的基础上，根据各种参数的分级和对比分析，可将地壳稳定性划分为4级：即Ⅰ级（稳定的）、Ⅱ级（次稳定性的）、Ⅲ级（次不稳定的）、Ⅳ级（不稳定的），这种评价方法最早由李兴唐等（1987）提出，其后有所深化。这种方法的可靠性，取决于资料的丰富程度，有些深部地球物理资料尚难取得，指标分级标准尚需深入论证。其分级指标评价如表1所列：

表1 区域地壳稳定性分级和主要指标评价表

Table 1 Regional crust stability grading and the main evaluation index

稳定性分级	大地构造特征	第四纪升降运动速率 $s$ (mm/a) 火山活动	断裂活动性			叠加断裂角 $\alpha$	最大震级 $M$	基本烈度 $I_b$	地球大地热流值 $MW/m^2$	物理布格异常梯度值 $B_s$ ( $\times 10^{-3} cm \cdot s^{-2} \cdot km^{-1}$ )	工程建筑适宜性及抗震措施
			年龄 $\times 10^4$ aBP	活动速率 (mm/a)	综合评价						
稳定 (Ⅰ级)	地盾、地台古老结晶基底 (前寒武纪缺乏深断裂带, 地壳完整)	均匀上升或下降 ( $s > 1$ 或 $s < -1$ ), 无第四纪火山	> 240 或 240 ~ 73	0 ~ 0.1	不活动	$\alpha = 0^\circ$ 或 $100^\circ$	$5 \frac{1}{2}$	$\leq VI$	$\leq 60$	无梯度 < 0.60	适宜所有类型工程建筑, 不需抗震设计
次稳定 (Ⅱ级)	古生代褶皱带中地(岩)块、深断裂较发育, 地壳较完整	不均匀升降, 轻微差异运动 ( $s = -0.1 \sim 0.4$ ), 无第四纪火山	73 ~ 6	0.1 ~ 1.0	不活动或微活动	$\alpha = 11^\circ \sim 24^\circ$ $\alpha = 11^\circ \sim 70^\circ$	$5 \frac{1}{2}$ ~ $6 \frac{1}{2}$	$VI \sim VIII$	60 ~ 75	0.60 ~ 1.0	适宜某种规模类型工程建筑, 需抗震设计
次不稳定 (Ⅲ级)	中、新生代褶皱带盆地、槽地边缘、裂谷带、深断裂发育, 地壳破碎	显著断块差异 ( $s = 0.4 \sim 1$ ), 存在第四纪火山	5 ~ 1.1	1.0 ~ 10	较强烈活动	$\alpha = 25^\circ \sim 50^\circ$	$6 \frac{1}{2}$ ~ 7.0	$VIII \sim IX$	76 ~ 85	1.1 ~ 1.2	适宜某种规模类型工程建筑, 需专门抗震设计
不稳定 (Ⅳ级)	新生代褶皱带、板块碰撞带、现代板块伏冲带, 现代岛弧深断裂发育, 地壳破碎	强烈断块差异运动 ( $s > 1$ ), 存在近代火山	< 1.1	> 10	强烈活动	$\alpha = 25^\circ \sim 50^\circ$	> 7.0	$\geq X$	> 85	> 1.2	一般不适宜大型工程建筑, 如需建筑必须特殊防震抗震设计

据李兴唐, 1987 改编

### 3.2 区域稳定性分区评价法<sup>[4]</sup>

这种评价方法应用比较广泛，最早始于“广东大亚湾核电站区域稳定性分区评价”<sup>[5]</sup>。根据以往及实地调查资料，编制了系列图件如：区域构造体系及地震震中分布图、新构造运动图、第四纪地质图、选址地区较大比例尺的地质图、不同上延高度（ $\Delta T$ ）的航磁延拓图、选址地区活动断裂带及地（岩）块分布图，在这些图件的基础上编制选址地区区域稳定性分区评价图（1:10 万），在这张图上按构造体系、隆起和拗陷进行一级区划；按断裂组合关系、断裂活动性、地震活动性、断块的介质结构特征，划分 II 级区域为亚区；按水文地质、工程地质条件的差异，进行 III 级划分（地段）。然后利用各地段的相对稳定性综合因素  $R_s$ ，其受岩体完整性因素  $Q$ ，裂隙率  $K_{cp}$ ，活动断裂错动速率  $S$ ，外来影响  $I_i$  烈度，山体稳定性因素  $K_h$  等诸多因素控制，其函数表达式为：

$$R_s \left( Q \cdot K_{cp} \cdot S \cdot I_i \cdot K_h \right)$$

然后按 5 种因素的重要性确定其权值，进行加权平均以求得区域稳定性因素，其稳定性综合指标：

$R_s = 4 \sim 5$  为稳定的；

$3 \sim 3.9$  为次稳定的；

$2 \sim 2.9$  为次不稳定的；

$< 2$  为不稳定的。

这种方法是区划与分级指标评价相结合，与前法不同之处，仅仅是所采用指标的不同，但各有侧重，后者利于结合实际情况，所采取指标也比较容易获得。根据所取得的区域稳定性因素优选相对稳定的“安全岛”，与“安全岛”多级逼近的优选是一致的，也是一种半定量的评价方法。

### 3.3 区域稳定专家系统

这种评价法是一种新近发展起来的计算机辅助决策评价法<sup>[6]</sup>，殷跃平博士充分吸收了国际原子能机构关于核电站选址地质地震评价等 5 种权威专家的知识，并运用图论的结构矩阵法研究其专家知识结构框架，探求本学科专家知识结构的合理性和优化性，为建立知识库和专家知识的提取打下基础，结构模型是一种图论的分析方法，他是将网络图（或复杂系统）元素之间的关系用矩阵的形式表示，从而揭示网络图中大量元素之间的内在关系（因果、上下、大小等），并通过计算机将之解成条理分明多级递阶的结构形式，由此建立了区域地壳稳定性研究的专家知识模型，其评价内容包括“与地震、地质有关的地质灾害”，“与地震有关的地面运动”和“场区及地表断裂作用”三大方面<sup>[6]</sup>。然而，通过评价内容的综合分析研究，其最终目的，是要为工程场地选择出相对稳定的“安全岛”，而相对稳定地块的评价判别标准<sup>[4]</sup>有下面 9 条：

- (1) 构造部位上属于断块或僵化的褶皱带；
- (2) 地块内无活动断裂切割；
- (3) 在场区范围内无弱震以上地震记载；
- (4) 无迹象表明第四纪以来场区内有岩浆或水热活动；
- (5) 地块内水热活动不强烈；
- (6) 地块内基本烈度不超过 VIII 度，或者比邻区低；
- (7) 区域物理地质作用弱，对场区无灾害性危害发生；

- (8) 人为工程活动不会导致严重灾害等；  
 (9) 地块应有一定规模，通常在数十平方公里以上。

但“安全岛”的判别，又必须与“地震空区”进行严格地识别和鉴定，以免造成严重谬误<sup>[4]</sup>。

## 4 “安全岛”理论和方法的应用实例

为了进一步实践“安全岛”的理论和方法，地质力学研究所易明初等首次开展了 1:500 万全国区域地壳稳定性图的编制工作<sup>[7]</sup>，从而使“安全岛”研究工作更加走向成熟和完善。

该图汇集近 20 年来地质、地球物理及与区域地壳稳定性评价密切相关的地震、地形变、地质灾害等最新研究成果，运用“安全岛”的理论和方法，以活动构造体系和块体为中心，现代地壳形变为重点，采用定性和定量化相结合，又以定量为基础，用网络逐级分割方式，开展模糊数学综合评判、图象识别、专家系统和风险度评价等 3 个层次的逐层综合评价，在相对不稳定和次不稳定中筛选出相对稳定的地块“安全岛”，进而为国土规划和重大工程建设提供安全可靠的建筑场地和科学依据。

通过上述方法和定量化综合评价，在全国范围内第一层次 1000 个网络单元模糊综合评判统计结果，出现稳定区 14 个、基本稳定区 4 个、次不稳定区 17 个、不稳定区 13 个。随后在上述次不稳定（175 个单元）和不稳定区（29 个单元）中，再将每一个单元一分为四，并进行第二层次的图象识别分析，按“安全岛”思想，又筛选出相对较好的 430 个次不稳定单元和 40 个不稳定单元。相反，其余单元均为较差的极次不稳定和极不稳定区。同样道理，采用不同方法对需要继续再细分的更小单元进行综合评价，在相对较差的地区，又可进一步再筛选出较好的地区等等。因此，该图通过 3 个层次的网络逐级分割综合评价，在全国范围内，划分出稳定区 24%，基本稳定区 56%。当然，由于地质条件复杂性和不确定性，因此在进行区域稳定性评价时，尚需进行设计阶段的专门性勘察论证。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 胡海涛, 易明初. 青藏铁路沿线(格尔木—那曲)的区域稳定性 [ A ]. 全国首届工程地质学术会议论文集 [ C ]. 北京: 科学出版社, 1983. 15.  
 [ 2 ] 李四光. 论地震 [ M ]. 北京: 地质出版社, 1977.  
 [ 3 ] 李四光. 地质力学概论 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1973.  
 [ 4 ] 胡海涛, 殷跃平. 区域地壳稳定性评价“安全岛”理论及方法 [ M ]. 地学前缘, 1996, 3 ( 1 ): 57 ~ 68.  
 [ 5 ] 胡海涛, 易明初, 等. 广东核电站规划选址区域稳定性分析与评价 [ M ]. 北京: 档案出版社, 1987. 94 ~ 113.  
 [ 6 ] 殷跃平, 胡海涛, 康宏达. 重大工程选址区域稳定性专家系统 [ M ]. ( CRVST AB ) 北京: 地震出版社, 1992. 15.  
 [ 7 ] 易明初, 等. 中国区域地壳稳定性图 ( 1:5000000 ) 及说明书 [ M ]. 北京: 地质出版社, 1997.

# THE THEORY AND METHOD OF EVALUATION OF REGIONAL CRUSTAL STABILITY BASED ON CONCEPT OF “ SAFE ISLAND ”

HU Hai-tao

( *Institute of Prospecting of Hydrological and Engineering Geology , 100081 , China* )

**Abstract** : The concept about “ safe island ” created by late Professor Li Siguang ( J. S. Lee ) is described in this paper from that there are a few weak destroyed districts in high intensity area of a strong earthquake. Author pointed out so-called “ safe island ” means the area which belongs to relative stability massif from the point of view tectonic activity. The regional crustal stability grading and its main evaluation indexes are given in the paper.

**Key words** : safe island ; crust stability