



中国区域地壳稳定性图

1 : 5 000 000

说明书

中国地质科学院地质力学研究所编图组

地质出版社



56.23

P 285.1

56514
56514

中国区域地壳稳定性图

1 : 5 000 000

说明书

中国地质科学院地质力学研究所编图组



地质出版社
· 北 京 ·

主 编：易明初（研究员、教授）

副主编：王连庆（副研究员）

编 图：李 晓（副研究员） 乔子江（工程师）

萧树棠（研究员）

指 导：崔盛芹（教授） 殷跃平（博士、高工）

顾 问：孙殿卿（院士、教授）

目 录

前 言	1
1 编图原则和方法	2
1.1 编图原则	2
1.2 编图步骤和方法	2
2 图面内容	3
2.1 地层	3
2.2 地(岩)块或“块体”	3
2.3 活动构造带	4
2.4 岩浆活动	5
2.5 深部地球物理资料	6
2.5.1 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 布格重力异常	6
2.5.2 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 均衡重力异常	7
2.5.3 地温梯度和温泉	7
2.6 现代地壳形变	7
2.6.1 地壳垂直形变	8
2.6.2 现今断裂活动	8
2.7 地质灾害	10
2.7.1 地震	10
2.7.2 崩塌、滑坡、泥石流	10
2.8 现今构造应力活动	11
3 中国区域地壳稳定性综合评价	11
3.1 第一层次模糊综合评判	13
3.2 第二层次图像识别	14
3.3 第三层次专家系统评价及“异常点”	16
3.4 结论和验证	16
参考文献	18

前 言

1:5 000 000 中国区域地壳稳定性图^①是地质矿产部“八五”期间重大基础项目的一部分。

编制中国区域地壳稳定性图,首先是为了满足厂矿、能源、城市和交通等重大工程建设及国土规划与整治的需要,其次,从科学研究的角度看,也很需要在前期各省区地壳稳定性及与之有关的资料的基础上做一个系统总结,使地壳稳定性研究达到一个新水平。全国性区域地壳稳定性图的编制尚属首次,它填补了我国地质图系中的空白。

“区域地壳稳定性”术语及其基本概念为我国所独创。区域地壳稳定性图是一种综合性图件,集中反映一个地区现代地壳活动性特征及其基本活动规律。通过本图进行分区评价,可为国家重大工程建设地区提供安全可靠的基地。

区域稳定性研究工作,早在50年代的三峡水利工程规划、南水北调工程选线中,围绕活动断裂、新构造活动、地震活动和地质构造等方面进行过分析与评价。李四光教授于50年代对西北地区滑坡作了调查研究,并于60年代初期首次提出了“安全岛”基本概念。随之,又在西南的重大工程建设地区、京津唐地区开展了地震地质、地应力测量和断层位移测量等工作。上述工作均为后来的“区域地壳稳定性”基本概念的建立及工作的全面开展奠定了基础。随着经济建设和改革开放的深入发展,工程地质专业研究领域也迅速发展,从“区域工程地质”研究发展到“区域地壳稳定性”研究的新阶段。其中,李四光、刘国昌和谷德振等老一代地质学家作出了重大贡献。特别是唐山地震以后至1979年全国首届工程地质大会之间,先后在长春地质学院、中国科学院地质研究所、中国地质科学院地质力学研究所、南京大学和成都地质学院等单位建立了相应的研究中心。然而,在国外并无此项研究,只是俄罗斯受中国的影响,组建了一个由少数国家参加的国际性活动构造及地壳稳定性研究中心,但因种种原因,工作难以开展。

总之,区域稳定性研究工作,已从调查研究、评价、编制局部工程地区图件,发展到编制大区、大江和大河流域区域性图件;从定性研究发展到80年代以来的定量化、数值化和计算机模拟的研究新阶段。

1:5 000 000 中国区域地壳稳定性图,以计算机为手段,采用先进的、科学的网格逐级分割和多层次逐级评价;应用地质力学的理论和方法,以活动构造体系为核心,“安全岛”为指导思想,现代地壳形变为重点,对中国区域地壳稳定性进行了全面的评价和研究。

本图从我国的国情出发,对全国的地壳稳定性进行了最大限度的分区,是一份科学性和实用性很强的图件。

① 本图主要由地质矿产部提供经费,但在修编过程中又得到地质矿产部地质力学开放研究实验室的部分经费资助。

1 编图原则和方法

1.1 编图原则

“区域地壳稳定性”是指工程建设地区,在内、外动力(以内动力为主)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(胡海涛、易明初,1979)。后经多年实践,在工程建设应用中这一概念又得到新的发展,提出了“块体构造”和“块体稳定性”的新观点(易明初,1981)。

“安全岛”是我国著名地质学家李四光教授于1965年和1967年先后两次在指导地震地质工作时,对在活动构造带中确定和寻找相对安全的地区而提出的通俗直观概念,用它来比拟活动构造带内地壳相对稳定的地区。在核电站选址中可与“核岛”相对应。在区域地壳稳定性评价研究中,“安全岛”即可厘定为“相对稳定地区”或“相对稳定地块”。

本图的编制是依据区域地壳稳定性的基本概念,以“安全岛”的理论为指导思想,以活动构造体系或主干构造带及它们所围限的块体研究为基础,重点展示地震活动和断裂活动研究成果,并根据网格划分法,分单元、分三个层次逐层深入进行地壳稳定性评价。由于采用了“网格划分逐层深入”的评价方法,稳定性评价成果图的表示,不像以往按等值线连片反映不同稳定程度区,而是直接分单元评价按网格表示最终稳定性结果。采用网格单元表示,在区域地壳稳定性评价图中尚属首次。网格单元在数据采集、分析和数值模拟等方面具有较强的可操作性及定量化的优点,突出了每个单元综合评价的可靠性和科学性。但限于资料和小比例尺等原因,网格不可能无限细分,势必存在评价分区界线与地质构造边界拟合问题。为了解决这一问题,根据定量化评价辅以定性分析和局部重新评价的原则,对第一层次($100\text{km}\times 100\text{km}$ 单元)的稳定性分区中部分单元与构造边界拟合程度较差者,以及单元之间稳定等级突变——即不属于逐级相邻的部分地区,重新进行稳定性评价。重新评价单元的比例不应超过总评价单元的5%。本图稳定性类型的划分除了通常采用的四级划分法,即稳定、基本稳定、次不稳定和不稳定外,为了最大限度提高国土资源利用率,为国家提供更大范围的优质的工程建设场地,对于次不稳定区和不稳定区又进行了稳定性分类。这样最终稳定程度类型就按稳定性“优”、“劣”分为稳定、基本稳定、次不稳定、极次不稳定、不稳定和极不稳定六个稳定等级。

1.2 编图步骤和方法

采用三步走的编图步骤。第一步,编制同比例尺($1:5\,000\,000$)活动构造及地(岩)块图、地质灾害图、深部构造图和现代地壳活动及形变图等基础性资料图件。第二步,在上述基础图件资料收集和编制基础上,建立区域地壳稳定性分类评价指标表。之后,依据该指标表按网格单元提取参与稳定性评价的地质指标数据,输入区域稳定性评价数据库。第三步,在前面两步工作基础上,正式编制区域地壳稳定性综合评价最终成果图。根据“网格划分逐层深入”的评价方法,中国区域地壳稳定性最终成果图按以下三种定量化数值模拟方法评价编制。第一个层次 $100\text{km}\times 100\text{km}$ 研究单元应用模糊数学的综合评判法,稳定性类型划分为稳定、基本稳定、次不稳定和不稳定四个等级。第二个层次 $50\text{km}\times 50\text{km}$ 研究单元稳定性评价,应用图像识别原理,把第一层次评价得出的次不稳定区和不稳定区,通过进一步的研究,评价为次不稳定和极次不稳定、不稳定和极不稳定类型,以提高不稳定

区稳定性评价的精度。而第三个层次评价则主要是针对目前国家一些重点工程建设地区,应用重大工程选址区域地壳稳定性评价专家系统(CRUSTAB, 1992)再进行深入细致的论证评价。

2 图面内容

此次编图主要以收集和整理前人已有地质成果的办法,获取稳定性评价的基础资料。这些基础资料可以归纳为下述三大类:一类主要反映“建造”的地质资料,其中包括岩性、构造以及断裂的密度、长度和活性等数据。另一类是有关地球物理场方面的资料,这类数据主要反映地壳动力学特征,包括重力场、地热场和现代地壳应力场等方面。第三类数据是有关地质灾害资料,包括地震、滑坡、崩塌和地面形变位移等。一般在稳定性评价研究中,前两类地质数据是影响和制约稳定性评价的关键,而第三类地质灾害数据仅反映以往一个地区历史上地壳活动的状况。

因此,中国区域地壳稳定性图在考虑图面“负担”和“美观”的前提下,分两个层次表现所涉及的地质基础资料和稳定性评价的结果。根据李四光教授的建造与改造相结合,线与块相结合的原则,图面的第一层次主要反映地层、地质构造、构造块体和活动构造带,以及岩浆活动、地球物理场特征和由内、外动力地质作用产生的各类构造形迹和地质灾害等诸多因素。而图面第二层次表现的内容,即用色标显著表示的部分,则分配给了区域地壳稳定性评价结果。这个层次反映的是稳定性研究最终成果,与第一层次基础资料相比,相当于“上层建筑”。下面对区域地壳稳定性评价涉及的基础资料数据,即图面上第一层次表现的内容作简明介绍。

2.1 地层

依据1:5 000 000中国地质图(1990),按照构造层合并的观点,时代越老合并越粗、时代越新划分越细的合并原则,由新至老将地层合并划分为第四系(Q)、新近系(Ng)、古近系(Pg)、新生界(Kz)、中生界(Mz)、古生界(Pz)和前古生界^①(AnPz)7个构造层。

2.2 地(岩)块或“块体”

李四光教授所定义的地块为一些规模较大,组成较复杂,具有双层结构,盖层变形较微弱的块状构造形体(简称“块体”)。岩块系指一些规模较小,不一定具有双层结构,主要由一种岩类(如沉积岩、变质岩、侵入岩)所组成的,有别于周围的较均一的构造形体。通常,地块和岩块被构造带所围绕,主要被全新世活动构造体系(带)限制,形成多边形的块状结构,形态和结构上与周围构造有明显差异。地块和岩块或有大片盖层覆盖,或是裸露的侵入岩或变质岩,一般形成统一地貌单元,如盆地、高原、平原、山间盆地和断块山等。

根据上述地(岩)块定义和划分原则,为加强地(岩)块的构造含义和地近期活动形变特征,将地(岩)块的块状构造形体内涵引入该图,并简称块体。本图表示的主要构造

^① 北方为Ar—Pt₁(>1800Ma);南方为AnZ(>800Ma)。

块体有准噶尔块体 (B_1)、塔里木块体 (B_2)、柴达木块体 (B_3)、羌塘块体 (B_4)、阿拉善块体 (B_5)、鄂尔多斯块体 (B_6)、松辽块体 (B_7)、华北块体 (B_8)、华南块体 (B_9) 和兴安-内蒙古块体 (B_{10})。

2.3 活动构造带

本图拟定的活动构造为全新世以来新生的或有过继承运动和位移,在不久将来可能再生或继续运动或位移的构造,主要指断裂和褶皱构造。

李四光教授在提出“安全岛”概念的同时,还指出活动构造体系所展布的范围并非都是活动区,仅仅是其中的构造带有不同程度的活动性,而构造带之间夹持的地(岩)块和块体等则是相对稳定的。这种块状构造的稳定程度取决于各种因素的综合影响,如块体岩层越新,基底越破碎,稳定程度就越差,相反则稳定。此外,活动构造带内的各条断裂也有活动程度强弱之分。这些断裂间所夹的次级地块或被包容的古老构造片段,可能又是次一级相对稳定地区。反之,在稳定区内也可能存在相对活动地带。因此,中国区域地壳稳定性图的编制是在区域构造体系划分、现今活动构造体系和相对稳定地(岩)块“安全岛”的思想指导下,根据 1:2 500 000 中华人民共和国及其毗邻海区构造体系图(1984)以及 1:4 000 000 中国及邻近海域活动构造图(1990)中提及的活动构造的成带性和展布规律,将中国活动构造带划分为如下五种类型:(1)纬向活动构造带、(2)经向活动构造带、(3)北东—北北东向活动构造带、(4)北西—北北西向活动构造带、(5)弧形活动构造带。

(1) 纬向活动构造带

此类活动构造带主要有天山-阴山东西向活动构造带(A_1)和昆仑-秦岭东西向活动构造带(A_2)。

天山-阴山东西向活动构造带,展布于北纬 40° — 45° 间,长约 4 000km,分为东、西两段。西段由天山北缘断裂、天山南缘断裂及所夹持的构造岩块组成;东段由包头-呼和浩特断裂带组成,控制了河套槽地的北缘边界。

昆仑-秦岭东西向活动构造带,总体走向近东西,秦岭以西展布于北纬 34° — 36° 间,秦岭以东位于北纬 33° — 34° ,是一个延伸达 4 000 余公里,横亘于我国中部的巨型复式隆褶带。该构造带活动断裂主要分布在西部昆仑山和中部秦岭一带。昆仑山带由叶城-和田断裂、慕士山断裂、阿尔格山断裂和可可西里山断裂等组成。该带西端与青藏弧形构造带截接-重接,在慕士山地区被北东东向的阿尔金山断裂带切割,向东在可可西里山地区与青藏系重接。秦岭断裂带由一系列东西走向平行排列的断层组成,主要活动断裂为秦岭北缘断裂,为渭河地堑南侧边界的控制性断裂。

(2) 经向活动构造带

经向活动构造带主要指横贯中国南北,地理上位于银川—成都—昆明一线,与重力梯度带、磁异常带和地壳厚度陡变带位置基本吻合的南北向活动构造带。以秦岭为界,该带分为南、北两区。

北区,银川南北向活动构造带(A_3)。北起内蒙古桌子山,经贺兰山、青龙山、大小罗山、云雾山,南延至甘肃境内,长达 500 余公里,由数条北北东和南北向断裂带组成。主要活动断裂有贺兰山活动断裂等。

南区,川滇南北向活动构造带(A_4)。南北长千余公里,是一个长期多次活动,伴有巨

型断裂的复式隆褶带。该带包括的主要活动断裂有安宁河断裂、雅鲁江断裂、绿汁江断裂、小江断裂、昆明断裂和巧家断裂等。

(3) 北东—北北东向活动构造带和北东向活动构造带

北东—北北东向活动构造带主要划分为东北活动构造带(A_5)、郯庐活动构造带(A_6)、东南沿海活动构造带(A_7)、太行山山前活动构造带(A_8)、大同—汾渭活动构造带(A_9)和台湾活动构造带(A_{10})。北东向活动构造带主要为阿尔金山活动构造带(A_{11})。东北活动构造带主要由孙吴—辽东湾断裂带、敦化—密山断裂带和鸭绿江断裂带组成。孙吴—辽东湾断裂带控制了松辽块体的东界和白垩系的分布。敦化—密山活动断裂控制了第四纪火山喷发岩和碎屑岩。郯庐活动构造带主要由走向北东、延伸 800 余公里的 4 条平行断裂组成。东南沿海活动构造带位于东南沿海,由数条北东走向平行排列的断裂组成,主要为长乐—南澳断裂与政和—大埔断裂。太行山山前活动构造带展布于太行山前及隆起带的核部,走向北东,长约 300km。大同—汾渭活动构造带,展布于大同盆地—汾渭盆地,长约 700km,北东走向呈“S”形,由一系列呈多字型排列的断裂组成,控制了诸多新生代盆地的形成和展布。台湾活动构造带由几乎遍及台湾全岛的,不同规模的北北东向褶皱、挤压带及派生构造组成。阿尔金山活动构造带横亘于塔里木块体和柴达木块体之间,由一系列呈北东方向平行展布的延伸上千公里的巨大断裂带组成,是中国连续平直延伸最长的断裂带。

(4) 北西—北北西向活动构造带

此类活动构造带主要包括祁连山活动构造带(A_{12})和阿尔泰山活动构造带(A_{13})。祁连山活动构造带总体走向呈北西向,延伸 800 余公里,由一系列断裂和褶皱带组成,控制了酒泉和张掖新生代盆地的形成和发展。阿尔泰山活动构造带展布于新疆北部,包括北西走向的二台断裂带等。

(5) 弧形活动构造带

此类活动构造带主要包括青藏弧形活动构造带(A_{14})和喜马拉雅山弧形活动构造带(A_{15})。

青藏弧形活动构造带,展布于帕米尔高原东部和塔里木块体西侧,由乌恰—赛图拉断裂和慕士塔格山—喀拉山断裂等组成。此构造带向东南方向延伸逐步与昆仑纬向带重接复合;向东延至可可西里山后,开始与纬向带逐渐分离,偏转为北西—南东方向;康定以南与南北向构造带重接复合。

喜马拉雅山弧形活动构造带,从班公错起向南东方向延伸,至改则转为近东西向,沿雅鲁藏布江向东至拉萨又逐步转为北西西和北北向,到墨脱一带与青藏弧形活动构造带汇合转为南北向,进入横断山脉与南北向构造带重接。

上述两个弧形活动构造带主要由一系列压性和压扭性大型断裂带组成,连续性好,旋扭性强,两者扣合起来,中间恰是形如橄榄核的羌塘块体。

2.4 岩浆活动

地(岩)块的性状和分布与岩浆岩的分布有一定关系,基性岩和超基性岩的带状分布与切割地壳较深的大型断裂有密切关系,这已是比较共同的认识。同时考虑到区域地壳稳定性评价主要反映的是现今地壳的活动程度,因此本图按岩浆岩的分类和分期,主要表示了一类两期中酸性深成岩,即燕山期花岗岩(γ_s)和喜马拉雅期花岗岩(γ_h)和喜马拉雅期

基性-超基性喷出岩 (β_6)。

此外,根据火山喷发活动时间,图上分前古近纪火山口和古近纪以来火山口表示不同时期遗留火山群(口)的分布位置,如五大连池火山口、长白山火山口、大兴安岭火山口、大同火山口、腾冲火山口、昆仑山火山口和海南岛火山口以及台湾岛火山口等。

2.5 深部地球物理资料

地壳深部构造及其活动性研究中,常使用一些地球物理场数据,如重力异常、重力均衡异常、航磁异常、地温、地温梯度和大地热流等。由重力反演或电磁测深或地震波速测定所获得的成果,可明确地显示地壳厚度及地壳或岩石圈分层和深断裂分布。重力和地热还是地壳活动的重要力源。重力异常和地温的空间分布状态可间接反映地壳活动性的强度及方向,也是构成区域地壳稳定性评价的部分因素。

2.5.1 $1^\circ \times 1^\circ$ 布格重力异常

$1^\circ \times 1^\circ$ 布格重力异常反映地壳深部结构和构造,通过重力反演可推测地壳厚度。地壳厚度等值线分布形状与 $1^\circ \times 1^\circ$ 布格重力异常等值线分布形状基本相同,因此将重力异常和地壳厚度分析并在一起阐述。

根据 $1^\circ \times 1^\circ$ 全国布格重力异常图(1:4 000 000)^①和全国莫氏面等值线图(1:5 000 000)^②分析,中国布格重力异常和地壳厚度分布的总表象与地形呈镜向关系。重力异常反映,大陆东部平原及海域为正异常,向西为负异常,青藏高原重力异常最低,达 $-654 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 。地壳厚度反映,盆地和平原地区地壳相对较薄,山区相对较厚。中国大陆地壳厚度总的是东薄西厚,山东半岛壳厚约33km,至藏北高原壳厚达70km。与大陆三个台阶及海域大陆架相对应,各级台阶前缘或大型山脉临平原或盆地前缘,大多分布有相应宽度及幅度的重力异常梯度带或地壳厚度突变带。中国大陆三条规模巨大的重力梯度带和地壳陡变带为:(1)大兴安岭—太行山—武陵山东梯度带和东部地壳厚度突变带;(2)中国中部近南北向重力梯度带,即六盘山—龙门山—乌蒙山—(向西转)洱海—(再向西)喜马拉雅山中部地壳厚度突变带;(3)环青藏高原重力梯度带,或青藏高原北缘西部地壳厚度突变带。

一般重力梯度带有深断裂相对应,如大陆东南缘梯度带对应舟山-厦门断裂;东梯度带中段对应太行山山前大断裂;南北向梯度带对应六盘山断裂、龙门山断裂、小江断裂;西部主、次梯度带自北而南对应阿尔泰断裂、富蕴断裂、北天山断裂、西昆仑断裂、阿尔金山断裂、祁连山断裂、昆仑山-布尔汗布达山断裂和喜马拉雅断褶带中央断裂等。另外也有些带段未发现相应深断裂,如东带武陵山段和环青藏高原带的青甘东部段带等。而大兴安岭段虽有对应深断裂,但成生于印支期,近期无明显活动。再者,重力梯度大或相对较大的段多有地震带对应,如台东地震带、邢台-河间地震带、南北地震带、阿尔泰山地震带、北天山地震带、祁连山地震带和东喜马拉雅地震带等。

① 地矿部物化探研究所等,中国布格重力异常图(1:4 000 000),1989。

② 地矿部航空物探大队,中国莫霍界面深度图(1:5 000 000)。

2.5.2 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 均衡重力异常

均衡重力异常反映地幔升降及地壳最新构造运动的方向和强度。据中国 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 平均均衡重力异常图 (1:4 000 000) 分析, 中国 $E115^{\circ}$ 以东, 基本为正均衡, 均衡值多小于 $+40\times 10^{-5}\text{m/s}^2$; 中国中部 $E100^{\circ}-E115^{\circ}$, 正负均衡杂陈, 绝对值大多小于 $+40\times 10^{-5}\text{m/s}^2$; 中国西部 $E100^{\circ}$ 以西, 正负均衡参半, 均衡异常值变化大, 为 $+120\times 10^{-5}-100\times 10^{-5}\text{m/s}^2$, 梯度也大。西部山系正异常值较高, 如喜马拉雅山、昆仑山、天山等; 而盆地多为负均衡异常, 且值较大, 如准噶尔盆地、塔里木盆地和柴达木盆地。中部山区为负异常, 但值不大, 如秦岭; 盆地多为正异常, 如四川盆地。东部山区和平原均为正异常, 值均不大。一般正负异常与隆起和沉降对应不协调区, 常为地震多发区。如塔里木盆地西部插入的舌状异常区、河北平原等。此外, 均衡异常等值线走向与构造线走向比较一致。

2.5.3 地温梯度和温泉

我国地热分布特征主要受区域地质构造及深部地壳结构控制, 与地壳厚度反相关, 与新构造活动正相关。

据中国地温梯度图 (1:12 000 000)^① 分析, 将我国划分出几条地温突变带及几片地温缓变区。东部地区地壳厚度较薄, 在 34—36km 之间, 盆地区的地温梯度多大于 $2.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 山区多小于 $2.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。其中, 松辽盆地地温梯度为 $3.0-4.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 最高为 $6.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$; 华北盆地地温梯度几乎均大于 $3.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 最高大于 $7.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$; 东南沿海地区地温梯度多大于 $2.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 局部最高可达 $6.0-7.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。台湾岛地温梯度一般为 $3.0-4.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 局部可大于 $7.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。中部地区: 地壳厚度 40—44km, 地温梯度多大于 $2.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 局部达 $3.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 以上。此区显然较东部地区盆地地温梯度低, 仅局部 (汾渭盆地南段) 较高, 地温梯度为 $3.5-4.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 反映新构造活动总体较弱, 仅局部较强。中部山区地温梯度与东部山区相仿, 一般低于 $1.5-2.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。西部地区以青藏高原北缘地壳厚度突变带为界, 划分为南、北两区, 即青藏区 and 新疆区。新疆区中, 盆地地温梯度在 $2.0-2.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 之间, 山区地温梯度一般低于 $1.5-2.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。青藏区中, 又分 4 种情况: 青海柴达木盆地达到 $2.5-3.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$; 阿尼玛卿—阿坝地区有一环状地温梯度升高片, 达 $2.0-2.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 以上; 藏南高温带地温梯度多大于 $3.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 带内盆地中部大于 $4.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 最高达 $5.0-7.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 以上, 受构造控制的高温异常区, 还可高出数倍; 藏北高原及三江地区地温梯度多小于 $1.5-2.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。

中国有温泉 2500 多处, 一般出露于山区及盆地边缘, 其分布特征总体与地温分布一致, 即高温温泉多出露于藏滇、台湾、闽粤等高地温梯度带的山区谷地或盆地边缘, 中温及低温温泉, 则多出露于中温及低温梯度带或区。图上仅表示了大于和等于 80°C 的高温温泉点 115 个。

2.6 现代地壳形变

现代地壳形变的研究在区域地壳稳定性定量化评价中占有重要地位。编制 1:5 000 000 中国区域地壳稳定性图, 依据的垂直形变和断层活动性资料, 主要来源于 1951—

① 王均等, 中国地温分布的基本特征, 1990。

1982 年间两次全国范围和多次区域性精密水准测量, 1:14 000 000 全国现代地壳垂直形变速率图, 以及根据地震矩法、地质方法、形变测量法和跨断层实测法得到的现今断层位移动数据。

2.6.1 地壳垂直形变

中国现今地壳垂直形变主要特点是, 以昆仑山—秦岭—黄淮平原的北缘为界, 以南地区普遍抬升, 尤以青藏高原和云贵高原抬升最为突出, 其中在喜马拉雅山和云南南部地区上升值达到 10mm/a; 而以北地区主要以下沉为主, 塔里木盆地、准噶尔盆地、柴达木盆地、华北平原及黑龙江流域均呈不同速率下降, 其中尤以准噶尔盆地北部 (最大下沉速率达到 -10mm/a)、黑龙江流域 (最大下沉速率值达到 -7mm/a) 以及天津地区沉降最为突出。中国现代地壳形变不仅存在南北分区的特点, 若以中部银川—昆明一线为界, 东、西两部的垂直形变特征也迥然不同。东部形变异常方向主要是北东或北北东向, 等值线相对稀疏; 而西部地区地壳形变异常方向主要为北西或北北西向, 且异常梯度变化快, 等值线呈密集状分布并延伸较长。从地震活动与垂直形变对应关系分析, 通常地壳形变速率的绝对值大小与地震活动性不存在直接对应关系。地震活动的强弱和发震地点主要与差异构造活动强度, 形变差异升降部位, 以及形变等值线转折、交汇和地壳强烈下沉等有关。

2.6.2 现今断裂活动

本图定义的现今活动断裂, 是指全新世 (约 10 000a) 以来有过活动的断裂。该定义与区域稳定性评价强调现今地壳活动有密切关系。因此, 图面上断裂活动分为全新世以前断裂和全新世活动断裂两类。其中, 根据 1:4 000 000 中国及邻近海域活动构造图断层分类, 参考地质方法、跨断层测量和大地形变测量得到的断层运动速率, 分强活动运动速率 ($v \geq 10\text{mm/a}$) 和中强活动速率 ($1\text{mm/a} \leq v < 10\text{mm/a}$) 两个等级; 据沿断层走向延伸地震活动性和地震烈度衰减规律, 又将全新世活动断裂分为强活动断裂段和中强活动断裂段。

总体上, 中国西部活动断裂系一般规模巨大, 以压性和压扭性为主, 兼左右旋, 部分地区以扭性为主, 以北西向或近东西向和弧形展布为特征, 并且活动性强。而中国东部活动断裂一般规模较小, 多为正断层兼扭性, 以北东和北北东向展布为主, 兼有新生的北北西向压性活动。如正在成生和发展之中的华北地区北北西向“华北系”构造, 个体规模虽不大, 但总体规模可观。根据活动断裂带的划分, 现将中国主要活动断裂的现今活动性阐述如下。

纬向活动构造带: 天山南、北缘活动断裂, 新生代晚期强烈活动, 常使一些老地层冲掩于上新世红层及第四系之上, 沿断裂地震频率高, 最大震级达 8.25 级 (库车)。昆仑山断裂在花石峡—玛曲段上曾发生过 7.5 级地震。秦岭北缘断裂历史上地震频繁, 最大震级为 8.0 级 (华县)。

经向活动构造带: 贺兰山活动断裂, 以正断层活动为主, 第四纪平均滑动速率为 0.5mm/a, 断错明代长城, 水平错距 1.45m, 垂直错距 0.35m, 历史上最大地震为 8.0 级 (平罗)。安宁河断裂形成时期较早, 地近期重新复活。据 ^{14}C 测定, 被其错断的 I 级阶地属晚更新世末期, 说明该断裂最新活动发生在晚更新世末或全新世初。该断裂以逆断层为主, 近代左旋平移, 第四纪运动速率为 0.47mm/a, 历史上最大地震为 7.75 级 (西昌)。小江断

裂为一条左旋平移兼逆冲的断裂,沿断裂带发震频率高,最新地震断层长 65km,最大震级为 7.5 级(东川。)

北东—北北东向活动构造带和北东东向活动构造带:孙吴-辽东湾断裂带以正断层为主,兼右旋平移,控制着近代地震、温泉、第四纪火山口和沉积物的分布,地震活动频度较低,最大震级 6.0 级。敦化-密山活动断裂,以逆冲为主,挤压强烈,控制第四纪火山喷发岩和碎屑沉积岩分布,最大震级为 7.75 级(牡丹江)。郯庐活动断裂,以右旋平移为主,第四纪以后有明显活动,控制地震的发生与分布,历史上最大震级为 8.5 级(临沂)。长乐-南澳活动断裂,以右旋平移为主,最大地震为 8.0 级(南澳)。太行山活动构造带,以正断层为主兼右旋平移,近代活动强烈,最大震级为 7.5 级(磁县)。汾渭活动构造带,以正断层为主兼右旋平移,晚近时期重新活动并进一步强化,带内地震频度较高,最大震级为 8.0 级(赵城、临汾)。台东活动构造带,现今活动非常强烈,许多断裂直接切过上新统及下更新统,在平原区及台东纵谷地区,出现中、上更新统和全新统北北东向的平缓褶皱。台东断裂以左旋平移为主,速率为 12.5mm/a,是中国地震强度最大、频度最高的断裂,自 1644 年至 1977 年,7 级地震有 39 次,最大震级达 8 级。阿尔金活动断裂,具左旋平移特征,全新世以来活动强烈,地震较频繁,自 1920 年来,发生大于 6 级地震 8 次,最大震级为 7.9 级(民丰)。

北西—北北西向活动构造带:祁连山活动构造带,晚近期重新复活,致使古生界逆冲到新近系及下更新统之上,沿带地震活动最大震级为 6—7 级。阿尔泰活动构造带,包括北西西走向的二台断裂带,晚近期强烈活动,切割现代洪坡积层,晚更新世以来,断层以左旋为主,位移达 2km,最大震级为 8.0 级(富蕴)。

弧形活动构造带:喜马拉雅山弧形活动构造带,第四纪以来以逆断层为主兼左旋平移,沿带地震活动,最大地震大于 8 级。

根据断层运动速率分析,中国中强水平位移活动断裂占有很大比例。以南北构造带为界,断裂活动强度分区特征明显。中国西部和西南部强活动和中强活动断裂比比皆是,断层两盘相对位移速率较大,平均多在 8mm/a 以上。以地质-地貌法计算第四纪以来的断层速率:怒江断裂水平运动速率为 10—15mm/a;祁连山断裂水平运动速率为 10—15mm/a;阿尔金断裂水平运动速率为 15—20mm/a;雅鲁藏布江断裂速率为 11.8mm/a;鲜水河断裂速率为 5—10mm/a;富蕴断裂速率为 11.5mm/a。跨断层测量结果:鲜水河断裂水平运动速率为 10.4mm/a;景东-维西断裂水平运动速率为 10.1mm/a。而中国东部地区,强活动断裂主要集中在台湾岛地区,中强活动断裂主要分布在鄂尔多斯周缘、华北盆地北端和东南沿海等地区;且断层两盘相对位移速率相对较小,除台湾区断裂平均运动速率为 12.5mm/a 外,多为 4mm/a 以下,甚至更小。用地质-地貌法对第四纪以来的断层速率测定结果:东北区,包括西拉木伦河断裂,平均小于 0.1mm/a;华北区断裂运动平均速率为 1.25mm/a,其中贺兰山山前断裂为 3mm/a,华北北缘断裂为 4mm/a,系舟山断裂 2mm/a;华南区平均运动速率较低,为 0.9mm/a,其中镇江-东台断裂活动速率为 1.27mm/a。跨断层测量结果:沧东断裂垂直运动速率较大,为 14—18mm/a;滦南断裂运动速率为 9.8mm/a;而纵跨中国东部的郯庐带的垂直运动速率,沈阳—潍坊段为 1.5mm/a,安丘—新沂段为 1.3mm/a,宿迁—嘉山段为 3mm/a。

因为地震活动带与现今断裂活动在空间分布上基本一致,活断层运动速率较大的强和

中强活动带、段,往往正是强震发生的场所,所以在区域地壳稳定性综合评价中,活断层的研究始终摆在一个重要位置。

2.7 地质灾害

2.7.1 地震

区域地壳稳定性评价中涉及和研究的地质灾害主要是地震。因此,地震活动性分析,是区域稳定性研究的又一重点。本图收集了自公元前 780 年到公元 1994 年间全国 $M_s \geq 5.0$ 级的地震数据及 1995 年以来部分强震资料(图面上仅表示了 $M_s \geq 6.0$ 级的地震),并应用了全国第三代最新地震基本烈度图——中国地震烈度区划图(1990)的资料。下面分东部、西部和台湾岛三片地区论述中国地震活动的基本规律。

中国东部地区,地震活动主要集中在鄂尔多斯隆起周缘、华北坳陷盆地、渤海湾和东南沿海等地区。华北坳陷盆地中发生的地震主要分布于现今仍在继续活动的大断裂带,以及断陷盆地边缘被现今活动断裂带所控制的地区。地震主要沿着活动性明显的北东和北北东向断裂带发生,在其与东西向断裂带复合交汇的地方,地震活动明显增强。鄂尔多斯地堑边缘由于被近东西、北东、北西和近南北向活动断裂带所控制,地震活动强而频繁。除此之外中国东部强震活跃区还集中在东南沿海的闽南和粤东一带。而东部、南部地区,包括四川盆地、贵州高原和湖南—江西的低山丘陵区,以及北部的东北平原地区总体上为少震弱震区。据中国地震烈度区划图分析,中国大陆东部地区基本烈度多 $\leq VI$ 度区。

中国西部地区,除塔里木、准噶尔、柴达木盆地少震外,绝大部分地区都有地震发生,与东部区相比地震活动明显增强。西部地区主要控震活动断裂带有阴山—天山纬向活动断裂带南北两缘、西昆仑山北缘活动断裂和川滇南北向活动断裂带等。尤其是沿南北向活动断裂带地震活动强烈。如鲜水河、小江、安宁河活动断裂均为强震活动场所。根据地震与发震构造的关系以及地震迁移规律和密集成带性,中国西部地震活动可划分为几条弧形地震带,即喜马拉雅弧形地震带、喀喇昆仑—鲜水河—小江弧形地震带、东昆仑—阿尼玛卿弧形地震带和阿尔金—祁连山弧形地震带。与东部区相比,中国西部地区地震烈度一般 $\geq VII$ 度,局部出现烈度 $\geq IX$ 度区。

台湾岛是中国地震活动最为频繁和强烈的地区之一。该区地震活动主要受环太平洋地震带西岸带的控制。自 1900 年以来台湾岛及邻近区发生 8 级强震 2 次,7—8 级地震 30—35 次,6—6.9 级地震 160 次。地震基本烈度为 $VIII$ 度和 IX 度。

2.7.2 崩塌、滑坡、泥石流

根据收集的部分大中型滑坡、崩塌和泥石流资料,参考最新中国地质灾害类型图(1:5 000 000),中国区域地壳稳定性图主要表现了与活动构造带有关的、沿大江或大河流域分布的部分巨型和大型崩塌、滑坡和泥石流。

中国崩塌、滑坡和泥石流的分布多呈条带状线状展布,主要分布于大江大河两岸、铁路和公路沿线及矿山、水利水电开发地区,而且沿活动断裂带与构造交汇和复合部位最为密集。一般规律是中国中部地区崩塌、滑坡和泥石流暴发频度高、分布广、危害大,主要发育分布地段在南北活动构造带,以及长江上游的横断山和黄河中上游黄土高原。西部地区暴发频度较高、分布较广、危害较大。青藏高原南部山地,内陆盆地周边的阿尔泰山、天

山南坡和昆仑山西段,崩塌、滑坡和泥石流都较发育。而中国东部地区外动力地质灾害的暴发频度明显降低、个体规模较小,但群发危害较严重,如东北的辽河流域和华北燕山地区东部山地的滑坡和泥石流。

2.8 现今构造应力活动

现今构造应力活动研究是从应力的大小和方向两个方面探讨区域地壳稳定性动力机制问题。本图通过收集和分析 124 个原地应力测量数据、202 个大震震源机制解结果和中国大陆构造应力场分区资料,以及地壳内环境剪应力分析成果^①,对全国现今构造应力活动的基本特征进行了初步分析。

大致以南北地震带为界,东西两区现今地壳应力活动状况差异显著。地应力测量绝对值分析,东部地区一般偏低,300m 深度上最大主应力值不超过 10kPa,而西部地区一般偏高,如甘肃金川矿区 500m 深度上,最大主应力值超过 30kPa。而从应力的方向分析,西部的新疆、西藏和甘、青、川、滇的西部地区,总体构造应力场方向呈近南北向;而中国东部地区应力场总体方向呈近东西向,并可以阴山和秦岭两个纬向构造带为界,划分出三个地区。阴山纬向构造带以北包括内蒙古东部和东北地区,主压应力方向为北东东向;秦岭纬向构造带以南包括台湾省在内的整个华南地区主压应力方向则是北西西向;而中部华北地区情况较复杂,大致以太行山为界,以东主压应力方向为近东西向或北北东向,以西为南北向。除上述大区域构造应力差异外,局部地区由于构造部位不同,地壳应力场方向有随构造部位而变化的规律。不论西部还是东部地区,主压应力方向都与活动构造的走向垂直或近于垂直,说明中国大陆规模较大的活动构造,对现今地壳应力活动有一定制约作用。此外地应力测量和震源机制解共同反映,地壳应力活动以水平应力为主导,当水平主压应力大于垂直应力时,地震活动频繁。中国西部、台湾和华北等地区,水平和垂直应力比值特征与强地震活动的关系即为佐证。而湖南、江西和安徽等省,地壳应力活动水平分量与垂直分量接近,或是垂直应力大于水平应力,无论历史上还是现代都很少有强震活动。

3 中国区域地壳稳定性综合评价

在前人所编大江、大河流域和各大经济区区域稳定性评价图的基础上,1:5 000 000 中国区域地壳稳定性图的综合评价,主要依据“网格划分逐层深入”的定量化综合评判的研究模式方法。这种稳定性定量化研究模式方法,突出反映李四光教授的“安全岛”思想,即通过网格单元划分,把中国区域地壳稳定性这样一个复杂巨系统,分解成一个个微小的单元,这无疑提高了稳定性评价的精度和准确性。因此,本图可为工程建设寻找更多和更可靠的相对稳定地块即“安全岛”。

本图应用该定量化评价模式方法,分三个层次进行地壳稳定性评价。第一层次,首先按 100km×100km 尺度,将中国国土网格单元化,然后根据中国区域地壳稳定性模糊综合评判分级(表 1),应用模糊数学加权平均的综合评判法,通过计算机分单元进行稳定性评价。第二层次,考虑到由第一层次评价得到的次不稳定区和不稳定区中仍有未被判别的

① 陈培善等,中国大陆地区潜在震源区的初步研究,1994。

相对稳定地块,再采用 $50\text{km} \times 50\text{km}$ 尺度,把上述次不稳定区和不稳定区网格进一步划小,根据稳定性图像识别特性提取标志,如Ⅳ、Ⅴ级极次不稳定区和极不稳定区图像识别特性提取(表2),应用图像识别理论中固定增量逐次调整分类法,进行第二层次相对稳定地块评价。通过第二层次稳定性评价,地壳稳定程度又被分为极次不稳定(Ⅳ)和极不稳定(Ⅴ)两个等级。而第三层次地壳稳定性评价,主要是针对目前国家建设确定的一些重点工程地区,应用区域稳定性专家系统进行评价,同时对区域地壳稳定性“异常点”进行分析。

经过上述三个层次的定量化评价,首次实现了用编图方式,在全国范围内对相对稳定地块——“安全岛”的寻找和评价。这种评价最大限度地扩大了相对稳定块体——“安全岛”的范围,最大限度地缩小了相对不稳定区面积,为国土资源的充分合理利用提供了科学依据。

表1 中国区域地壳稳定性模糊综合评判分级

因素 选择 稳定 等级	单元性状	构造活动	垂直地形变	地壳厚度异常及 布格重力异常	震级	烈度	地质 灾害
稳定 (Ⅰ)	均质完整的 岩体或前寒 武纪古老地 块,断裂不发 育,块状结构	区内无活动 断裂,断裂稀 疏	相对差异升 降 $\leq 1\text{mm/a}$	地壳界面平缓,莫 氏面起伏 $< 2\text{km}/$ 100km ,布格重力 梯度值 $< 50 \times$ $10^{-5} (\text{m} \cdot \text{s}^{-2}) /$ 100km	$M_s < 5.0$	$< \text{VI}$	物理地 质现象 不明显
基本稳定 (Ⅱ)	中生代盆地 和古生代沉 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	等值线平缓, 相对差异升 降 $1\text{mm/a} \leq v$ $\leq 2\text{mm/a}$	莫氏面起伏达 $2-4\text{km}/100\text{km}$,布格 重力异常达 $50 \times$ $10^{-5} - 100 \times 10^{-5}$ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2}) / 100\text{km}$	$5.0 \leq M_s <$ 6.0 或为 6.0 级地震邻区	VI VII	地面沉 降严重 或地裂 缝、岩 溶塌陷 较为严 重
次不稳定 (Ⅲ)	中生代和古 生代沉积区, 区内完整性 差或为新生 代沉积区,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 2mm/a $\leq v \leq 3\text{mm/a}$ 的梯度带	莫氏面起伏达 $4-8\text{km}/100\text{km}$,布格 重力异常达 $100 \times$ $10^{-5} - 150 \times 10^{-5}$ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2}) / 100\text{km}$	$6.0 \leq M_s <$ 7.0 或为 7.0 级地震邻区	VII	地裂缝 或岩溶 塌陷严 重,崩 塌、滑 坡、泥 石流灾 害较严 重
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	断裂密度较 大,长期多次 活动,长度大 于 100km ,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 $> 150 \times$ $10^{-5} (\text{m} \cdot \text{s}^{-2}) /$ 100km	$M_s \geq 7.0$	$\geq \text{IX}$	崩塌、 滑坡、 泥石流 灾害频 繁发生

表 2 IV 级极次不稳定区和 VI 级极不稳定区图像识别特性提取

x_1	是否为新生代断陷盆地?
x_2	是否存在现今中等(强烈)活动断裂?
x_3	是否位于断裂的端点、拐点、交汇或汇而不交的部位?
x_4	主要断层与主压应力叠加角是否为 25° — 50° ?
x_5	是否形变等值线密集, 位于显著差异升降扭曲部位?
x_6	是否位于重力异常变异部位? 如梯度带、重力高或重力低等值线边缘、挠曲部位
x_7	是否存在地温梯度带或呈线性分布?
x_8	是否位于环境剪应力值大于 10MPa 地区?
x_9	是否发生过 $M_s \geq 6.0$ (≥ 7.0) 级地震?
x_{10}	离最近的 $M_s \geq 6.0$ (≥ 7.0) 级地震距离是否小于 30 (50) km?

3.1 第一层次模糊综合评判

本图第一层次稳定性综合评判, 针对图上划分的 $100\text{km} \times 100\text{km}$ 单元, 应用模糊数学的综合评判法, 对地壳稳定性进行定量化数值模拟分析, 其具体步骤是, 首先采用心理量表的逐级估量法, 选择一组具有“正态型”分布特点的数代替隶属函数。为此, 本图选择了能满足以上条件的这样一组数: 1, 4, 8, 6, 3, 1。此外, 通过多年为工程选址所进行的区域稳定性研究实践, 本图依据地震活动和构造(断裂)活动是制约地壳稳定性的重要理论依据, 引用层次分析理论解决了权值求解, 计算得到的模糊评判权值如下:

权值 = $0.0900/\text{单元性状} + 0.2431/\text{构造活动} + 0.1166/\text{垂直形变} + 0.0566/\text{深部构造} + 0.1512/\text{地震震级} + 0.3048/\text{地震烈度} + 0.0377/\text{地质灾害}$ 。

其中, 地震震级加上地震烈度两项权值占整个权数的 45.6%, 而地震震级加地震烈度加构造活动 3 项占整个权数的 69.91%。因此, 无论实践还是理论计算都证明地震活动和构造活动在稳定性分析评价中起着重要作用。

最后, 按每个研究单元 4 种稳定级别 7 项地质因素提取稳定性评价数据(表 1), 设计了全国区域稳定性模糊评价数据库, 应用模糊数学“加权平均”数学模型, 完成了第一层次全国地壳稳定性的综合评价研究。其评价结果表达不再像以往定性划线分区, 而是按网格单元用不同颜色代表不同稳定程度区。绿色表示稳定区, 蓝色表示基本稳定区, 黄色表示次不稳定区, 红色表示不稳定区。

不稳定地区(红色区), 显示断裂活动和地震活动都较强烈。该类型区一般发生过 7 级以上地震, 地震基本烈度一般 ≥ 8 度。图上次不稳定区, 也就是黄色地区, 其分布形状和展布规律主要受现今大的、活动的构造体系(带)控制。因此, 次不稳定区又可分为纬向构造带控制的天山北次不稳定区、昆仑-秦岭次不稳定区和内蒙古呼和浩特次不稳定区等; 经向活动构造带控制的银川-昆明次不稳定区等; 北东或北北东向活动构造带控制的太行山山前次不稳定区和山东临沂次不稳定区等; 弧形构造控制的、规模较大的有沿雅鲁藏布江断裂的藏南次不稳定区和鄂尔多斯地块周缘次不稳定区, 以及祁连山次不稳定区和阿尼玛卿山次不稳定区; 而北西或北北西向活动构造控制的主要有中国西北的新疆富蕴次不稳定区等。