

中国地震局监测预报司资助

# 断层力学概论

黄福明 编著

地震出版社

013067653

P5  
04

中国地震局监测预报司资助

# 断层力学概论

黄福明 编著



地震出版社

P5

04

013087823

## 图书在版编目 (CIP) 数据

断层力学概论/黄福明编著. —北京:地震出版社, 2013. 6  
ISBN 978-7-5028-4270-3

I. ①断… II. ①黄… III. ①断层—地质力学—概论 IV. ①P55

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 090684 号

地震版 XM2089

## 断层力学概论

黄福明 编著

责任编辑: 樊 钰

责任校对: 李 珺

---

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路9号

发行部: 68423031 68467993

门市部: 68467991

总编室: 68462709 68423029

<http://www.dzpress.com.cn>

邮编: 100081

传真: 88421706

传真: 68467991

传真: 68455221

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大天成印务有限公司

---

版(印)次: 2013年6月第一版 2013年6月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 544千字

印张: 21.25

印数: 001~500

书号: ISBN 978-7-5028-4270-3/P (4958)

定价: 80.00元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

# 目 录

第1章 断层概述	1
1.1 断层、断层要素与断层带	1
1.2 断层的分类	2
1.2.1 断层的几何分类	3
1.2.2 断层的成因分类	3
1.3 活动断层	4
1.3.1 活动断层的定义	4
1.3.2 活动断层的标志	6
1.3.3 中国活动断层的分布	6
1.3.4 一些世界著名的活动断层	7
1.4 转换断层	10
1.5 地震断层	10
第2章 力学基础	15
2.1 均匀介质中的应力与应变	15
2.1.1 内力与应力	15
2.1.2 单向压缩情况下斜截面上的应力	16
2.1.3 双向压缩情况下斜截面上的应力	18
2.1.4 地壳应力的几个基本概念	21
2.1.5 变形与应变	22
2.2 弹性力学基础	24
2.2.1 三维弹性体的应力分析	25
2.2.2 三维弹性体的应变分析	31
2.2.3 应力与应变的关系	34
2.3 断裂力学基础	36
2.3.1 裂纹的三种基本类型	37
2.3.2 裂纹顶端应力分布的特征	38
2.3.3 裂纹系统的能量分析	40
2.3.4 裂纹的扩展过程与断裂	43
2.3.5 复合型裂纹的脆性断裂判据	45
2.3.6 弹塑性断裂力学简介	47
2.3.7 断层力学研究中应用断裂力学需注意的问题	51
2.4 岩石力学基础	52
2.4.1 岩石的物理力学性质	52
2.4.2 岩石的脆性破裂	63
2.4.3 岩石的力学模型	71
2.4.4 对应原理	79

第3章 断层的摩擦滑动 .....	82
3.1 摩擦力 .....	82
3.1.1 外摩擦力与内摩擦力、静摩擦力与滑动摩擦力 .....	82
3.1.2 初始摩擦力、最大摩擦力与残余摩擦力 .....	83
3.2 摩擦定律概述 .....	84
3.2.1 Amontons 定律 .....	84
3.2.2 Jaeger 定律 .....	84
3.2.3 Byerlee 定律 .....	84
3.3 断层面的接触类型 .....	87
3.3.1 尖点接触 .....	87
3.3.2 平面接触 .....	87
3.3.3 齿合接触 .....	88
3.4 岩石断面的摩擦滑动 .....	88
3.4.1 稳滑与粘滑 .....	89
3.4.2 影响稳滑与粘滑的因素 .....	89
3.4.3 粘滑前的重要特点——前兆性滑动 .....	97
3.4.4 稳滑与粘滑产生的物理机制 .....	98
第4章 断层的应力状态 .....	100
4.1 断层形成时的应力状态 .....	100
4.1.1 一般断层 .....	100
4.1.2 次生断层 .....	103
4.1.3 地震断层与构造应力状态 .....	108
4.2 断层上的应力 .....	110
4.2.1 活断层上的应力 .....	110
4.2.2 老断层上的应力 .....	121
4.3 断层附近的应力 .....	123
4.3.1 断层附近的应力集中 .....	123
4.3.2 断层附近的应力积累 .....	128
4.4 剪切生热与断层的应力状态 .....	131
第5章 断层的力学模型 .....	135
5.1 断层的弹簧-滑块模型 .....	136
5.2 断层的障碍体 (Barrier) 模型 .....	136
5.2.1 障碍体模型的主要内容 .....	137
5.2.2 障碍体模型的数值试验依据 .....	137
5.2.3 障碍体模型的野外证据 .....	141
5.2.4 障碍体的分类及其作用 .....	143
5.2.5 地震断层障碍体参数的估计方法 .....	144
5.2.6 断层障碍体模型的应用 .....	146
5.3 断层的凹凸体 (Asperity) 模型 .....	148

5.3.1	凹凸体模型的主要内容	148
5.3.2	凹凸体模型的应用	150
5.4	断层的多重凹凸体模型	151
5.4.1	多重凹凸体模型的主要内容	151
5.4.2	多重凹凸体模型的野外观测依据	151
5.4.3	多重凹凸体模型的一些应用	151
<b>第6章</b>	<b>断层的运动学模型</b>	<b>154</b>
6.1	位错理论的提出与发展	154
6.2	弹性静位错理论的基本概念	155
6.2.1	位错、位错线与位错面	155
6.2.2	两种类型的位错	156
6.2.3	刃型位错与螺型位错	157
6.3	断层的三维弹性静位错模型	157
6.3.1	Volterra 位错产生的位移场与应力场	157
6.3.2	断层的弹性静位错模型	158
6.4	断层的弹性动态位错模型	162
6.4.1	Heaviside 模型	163
6.4.2	Haskell 模型	164
6.4.3	Brune 模型	165
6.5	断层的粘弹性位错模型	167
6.5.1	粘弹性位错模型的建立	168
6.5.2	粘弹性位错模型的应用	169
6.6	断层位错模型的局限性	170
<b>第7章</b>	<b>断层的动力学模型</b>	<b>171</b>
7.1	无摩擦的二维裂纹破裂模型	172
7.1.1	Knopoff 模型	172
7.1.2	Starr 模型	174
7.1.3	无摩擦二维裂纹模型的应用	175
7.1.4	无摩擦二维裂纹模型的局限性及其初步改进	175
7.2	二维剪切裂隙自发 (spontaneous) 破裂传播模型	177
7.2.1	Kostrov 的法平面 (antiplane) 剪切裂隙自发传播模型	177
7.2.2	法平面剪切裂纹自发传播的一般理论	177
7.2.3	法平面剪切裂纹自发传播的时间过程	179
7.3	三维介质中摩擦断层复杂破裂传播数值模拟	179
7.3.1	平面摩擦断层破裂传播模型	181
7.3.2	平面断层上圆形凹凸体破裂传播数值模拟	182
7.4	三维倾斜断层运动不对称性的动力学模拟	185
7.4.1	物理模型和分析途径	185
7.4.2	数值模拟方法和结果	186

7.5	断层动力学模拟地震强度分布统计特征	189
7.5.1	滑块和弹簧系统的动力学模型	190
7.5.2	滑块和弹簧系统的地震强度分布统计特征模拟	191
<b>第8章</b>	<b>断层运动产生的应力波</b>	<b>194</b>
8.1	波动方程	195
8.2	地震波	196
8.2.1	体波	197
8.2.2	面波	199
8.3	地震前的长周期形变波	200
8.3.1	一些初步的观测研究	200
8.3.2	长周期形变波的基本特征	201
8.3.3	长周期形变波产生的物理机制	203
8.4	慢地震	203
8.4.1	慢地震的主要特征	203
8.4.2	慢地震与正常地震的关系	204
8.4.3	中国一些慢地震的例子	206
8.4.4	慢地震产生的物理机制	206
<b>第9章</b>	<b>断层运动产生的位移、形变与应力场</b>	<b>207</b>
9.1	位移场	207
9.1.1	直立断层错动产生的弹性位移场	207
9.1.2	倾斜断层错动产生的弹性位移场	212
9.1.3	断层错动产生的粘弹性位移场	219
9.2	应变场与倾斜场	223
9.2.1	直立断层错动产生的弹性应变场与倾斜场	223
9.2.2	倾斜断层错动产生的弹性应变场与倾斜场	224
9.2.3	粘弹性介质中的应变场与倾斜场	224
9.3	应力场	226
9.3.1	弹性介质中的应力场	226
9.3.2	粘弹性介质中的应力场	236
<b>第10章</b>	<b>断层蠕变滑动</b>	<b>239</b>
10.1	断层蠕变现象	239
10.1.1	美国圣安德烈斯断层的蠕变现象	240
10.1.2	土耳其北安纳托利亚断层的蠕变现象	240
10.1.3	中国一些断层的蠕变现象	240
10.2	断层蠕变类型	241
10.2.1	稳态蠕变	241
10.2.2	间歇性蠕变	241
10.2.3	地震前兆性蠕变	242
10.2.4	地震后断层蠕变	242

10.3	断层蠕变的传播方式	244
10.4	断层蠕变事件的经验定律	245
10.5	影响断层蠕变的因素与断层蠕变随深度的变化	247
10.6	断层蠕变的物理机制	247
<b>第11章</b>	<b>断层的非稳态滑动</b>	<b>249</b>
11.1	断层非稳态滑动前的性状	249
11.1.1	组合模型观点	249
11.1.2	断裂力学观点	250
11.2	地震断层破裂的传播与停止	250
11.2.1	地震断层破裂的传播方式	250
11.2.2	地震断层破裂的传播速度	251
11.2.3	地震断层破裂传播停止的机制	251
11.3	地幔物质运动与断层作用	253
11.3.1	地幔物质运动对断层活动的影响	253
11.3.2	地震断层活动的最大深度	254
11.4	构造地震的断层成因说	255
11.4.1	构造地震断层成因说的提出与发展	255
11.4.2	新断层的形成与地震	257
11.4.3	从断裂力学的观点看地震过程	260
11.5	地震参数与断层参数的关系	261
11.5.1	断层参数与震级的确定	261
11.5.2	震级与断层参数的统计关系式	262
<b>第12章</b>	<b>断层的相互作用</b>	<b>266</b>
12.1	位错理论观点	266
12.1.1	地震广义影响场	267
12.1.2	静态库仑破裂应力变化及其影响	272
12.1.3	地震的动态应力触发	276
12.1.4	地震应力触发的进一步思考	277
12.2	断裂力学观点	278
12.2.1	雁列式裂纹的相互作用	278
12.2.2	闭合裂纹的相互作用	280
12.3	断层相互作用对地震震源参数的影响	281
12.4	断层相互作用对地震前兆的影响	282
<b>第13章</b>	<b>断层运动的科学观察</b>	<b>284</b>
13.1	地质学方法	284
13.1.1	确定活断层的地质地貌标志	285
13.1.2	调查研究古地震的遗迹	285
13.1.3	估算活断层的滑动速率与地震的重复周期	285
13.2	大地测量学方法	287



13.2.1	跨断层位移测量	288
13.2.2	大地形变测量	290
13.3	地震学方法	292
13.3.1	确定断层的空间分布和活动水平	292
13.3.2	推测断层闭锁段的位置	292
13.3.3	确定地震断层参数	292
13.3.4	推测断层带未来可能发生的强震震级	293
13.3.5	研究断层地震破裂的全过程	294
13.3.6	探测地壳深部断层的结构与性状	294
13.4	遥感方法	294
13.4.1	航空像片的活动断层解译	294
13.4.2	卫星像片的活动断层解译	296
13.5	电磁学方法	296
13.5.1	采用大极距供电测量电阻率的分布	296
13.5.2	测定人工电流的感应磁场	296
13.5.3	观测电阻率与磁场随着时间变化的特性	297
13.6	地球化学方法	297
13.6.1	研究地下流体中化学组分及其比值的变化	297
13.6.2	研究土壤和断层岩石中气体化学成分的变化	297
<b>第14章 断层运动与地震预报</b>		298
14.1	与地震预报有关的基本问题	298
14.1.1	基本认识	298
14.1.2	基本途径	298
14.1.3	基本的争论	300
14.1.4	基本的困难	303
14.1.5	基本的出路	305
14.2	断层与地震前兆	306
14.3	断层蠕变在地震孕育与发生过程中的作用	307
14.4	断层蠕变与前震和余震的关系	308
14.5	断层蠕变与地震前兆形态的变化	309
14.5.1	定性解释	309
14.5.2	定量分析	310
14.6	断层蠕变与地震前兆的空间分布	310
14.6.1	地震活动性	312
14.6.2	地震应力降	312
14.6.3	地下水	314
14.7	断层蠕变观测中的几个问题	314
<b>参考文献</b>		316
<b>编后记</b>		331

# 第 1 章 断层概述

地球是无际宇宙中的一个天体，它每时每刻都在运动着。地球的结晶外壳是在地球形成、演化过程中逐步形成和发展起来的（雅各布斯，1979）。这个结晶外壳通常被人们称为地壳，它主要由各种岩石与岩石层组成。地壳在形成和发展过程中，受到地球内部和外部的作用力以及地球自转的作用力，致使地壳岩石层的产状与构造形态发生变化，这种变化通常称为构造变动。构造变动一般分为两大类，即岩石层发生弯曲的褶皱变动和岩石层发生断裂或错动的断裂变动（毕令斯，1959；斯宾塞，1981；宋春青等，1978）。当岩石层所受作用力达到一定强度时，它的连续完整性受到了破坏，发生断裂，并且沿着断裂面（带）两侧的岩层发生显著位移，称之为断层（亦称断裂）。

## 1.1 断层、断层要素与断层带

断层是断裂变动的一种重要形式，它是规模最大的断裂变动。断层的规模大小不等，其长度从小于一米、数十米，到数百、数千千米。通常小尺度的断层在地表的出露近似为一条线，而很多大断层则常常包括多条断层集合的宽阔地带。一般称单条的为断层，而多条断层的集合则称为断层带。断层是一种分布极为广泛的构造形态，在许多构造环境中均有断层发育，从与褶皱伴生的小断层到构成山脉边界的大型断层带以及岩石圈中其他大型薄弱带（例如板块的边界）。断层带的深度一般可达数千米，根据深源地震的深度推断，有的可能深达 700km。断层是地壳中的薄弱带，具有强度低与易变形的特点。

断层是在地壳构造变动过程中产生和发育起来的。断层（尤其是活动断层）在全球和我国均有广泛的分布，它不仅是一个与构造地质学、地震学和地球动力学中一系列理论问题有关的重要地质现象，而且它同矿产资源的形成与分布、大型工程的基础稳定性、地震危险区划与地震预报等均有着十分密切的联系。国内外的研究表明，许多矿产资源（尤其是有色金属）的形成、分布与富集以及强震或大震的发生往往同断层带的分布有关。因此，研究已有断层的分布与产状的特征及其近期的活动（特别是活动断层的运动）的特点，不仅可以了解地壳构造变动的历史，使之成为观察现今构造变动的重要“窗口”，而且可以指导矿产的合理开发和利用，促进地震科学研究的发展，科学地解决各种工程建设的稳定性和一些大中城市的可持续发展等问题。

断层包括断裂与位移两重意义。通常，用下列要素描述断层（图 1-1）：

①断层面。岩石层发生断裂并相对位移时，总是沿着一个破裂面进行，该破裂面被称为断层面。它可以是平面，也可以是弯曲的面或波状起伏的面；它可以是直立的，但大多数是倾斜的。断层面的产状系指断层面的空间位置，它常用走向、倾向和倾角来表示。

断层面与任一假想的水平面的交线称为走向线，走向线的方向即是断层面的走向。

断层面上与走向线相垂直并沿斜面向下的一条线称为倾斜线，倾斜线在水平面上的投影所指的方向即为倾向。倾向与走向垂直。

断层面与走向线直交的倾斜线与它在水平面上投影的夹角称为倾角。

②断层线。断层面与地面的交线称为断层线，亦称断层迹线或断层露头。它表示断层的延伸方向。

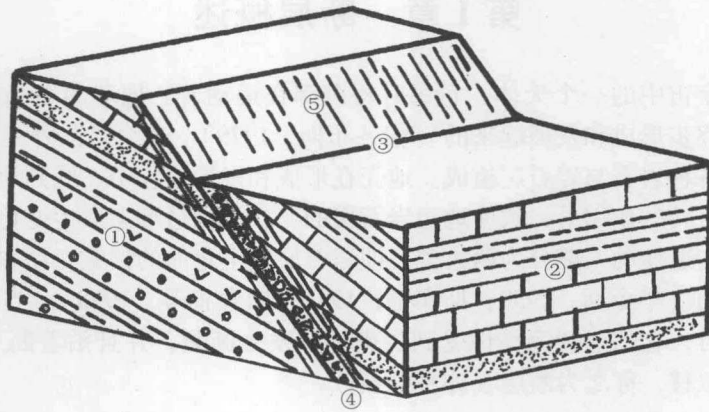


图 1-1 断层要素

①下盘；②上盘；③断层线；④断层破碎带；⑤断层面

③上盘和下盘。如果断层面是倾斜的，则位于断层面以上的岩块称为上盘，而位于断层面以下的岩块称为下盘。如果断层面是直立的，则常以方向来说明，如断层的东盘或西盘，左盘或右盘等。

④上升盘和下降盘。根据断层两盘位移的相对关系判断上升和下降。相对上升的岩块称为上升盘，相对下降的叫下降盘。

⑤错距。断层两盘相对错开的距离称为错距，又称为断距或滑距。错距一般分解为走向错距和倾向错距两个分量，走向错距是平行于断层走向的错距分量，倾向错距则是平行于断层面倾向方向的错距分量。

⑥断层破碎带。在构造运动中，大规模的断层往往不是沿着一个简单的面发生，而是沿着一个错动带发生，该带称为断层破碎带，其宽度从数厘米到数十米不等。

断层作用常在断层破碎带生成大小不一的多角碎块，同被碾得更破碎的岩屑胶结后便形成断层角砾岩。如果断层面两侧的岩石性质较软，则被研磨成为粉末状的断层泥，其外表和触觉均似黏土。在大规模逆断层和走向滑动断层的破碎带中常常形成糜棱岩，糜棱岩是在变形过程中始终保持黏合的细角砾岩，颗粒细而色暗，有时不易与沉积岩或火山岩区分。近地面的地带围压小，容易形成断层泥和断层角砾岩；而离地面愈深，围压愈大，岩石愈容易黏合形成糜棱岩。

实际上，一条断层的上述要素往往不是恒定的。随着构造环境和应力状态的差异，不同地段的断层面的走向、倾向、倾角和错距等都有一定程度的变化。

应当指出，上述要素仅用于描述单一断层，断层单一存在的情况是很少的。在构造变动中，断层往往成组出现，大小不等的诸多断层或是近乎相互平行，或是以一定的角度相交或趋于相交，构成断层带。因此在研究工作中，不仅要着眼于起主导作用的断层，而且对相关的断层也应给以足够的重视，这样才能从力学的角度弄清楚断层的成因。

## 1.2 断层的分类

所谓“分类”系指按特性的异同将事物区分为不同种类的思维方法。为了全面地描述

和研究断层，认识断层的分布规律和断层的成因，可以根据断层的不同属性或不同的标准对断层进行分类。常用的有几何分类和成因分类两种。

### 1.2.1 断层的几何分类

(1) 根据断层走向和岩层走向的关系可分为走向断层和倾向断层。

断层走向与岩层走向一致，可以使同一岩层重复出现或消失，称走向断层。

断层走向与岩层走向垂直，使断层两侧岩层因露头中断缺失而呈交替的不连续延伸，称倾向断层。

(2) 根据断层走向与褶曲轴向或区域构造线的关系可分为纵断层和横断层。

断层走向同褶曲轴向或区域构造线一致为纵断层，基本上是走向断层。

断层走向同褶曲轴向或区域构造线直交为横断层，基本上是倾向断层。

### 1.2.2 断层的成因分类

根据断层两盘相对运动的性质和力学背景，可将断层分成正断层、逆断层和走向滑动断层。

上盘相对下降、下盘相对上升的断层称为正断层，又叫重力断层。把一个地区分割成一系列地垒和地堑的断层叫做块断层。

正断层的断层面倾角比较陡，通常在 $45^\circ$ 以上。正断层滑动使岩层产生错距（图1-2C，*ab*段）。这主要是由于受到重力和构造运动产生的附加引张力共同作用而形成的。正断层的规模有大有小，错距从小于一米到数百米；断层线可以从数米到数百米，一般是比较平直的。

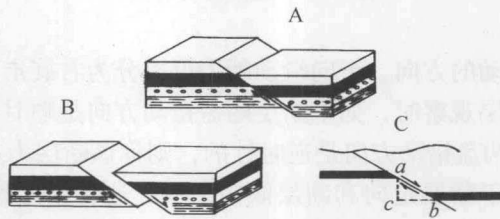


图1-2 正断层

A: 上盘顺断层面倾向滑动; B: 上盘顺断层面斜向滑动; C: 正断层剖面示意图

上盘相对上升、下盘相对下降的断层称为逆断层。逆断层滑动使岩层产生错距（图1-3C，*ab*段）。逆断层主要是水平侧压力作用的结果。

根据断层面倾角的大小，逆断层又可分为两类：断层面倾角在 $45^\circ$ 以上，其断层线比较平直，称为冲断层，也称逆冲断层。断层面倾角在 $45^\circ$ 以下的逆断层，断层面倾角平缓，规模十分巨大，称之为逆掩断层。

正断层和逆断层一般统称为倾向滑动断层。

断层两盘沿着断层面在水平方向发生相对位移并以走向错距为主的断层，称为走向滑动断层（图1-4），亦有称为平移断层、平推断层与扭性断层等。小型走向滑断层通常称为扳

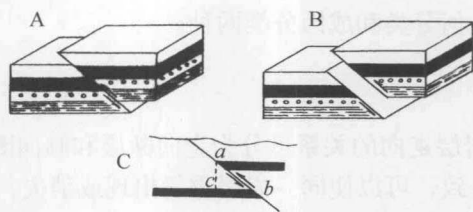


图 1-3 逆断层

A: 上盘顺断层面倾向向上滑动; B: 上盘顺断层面斜向上滑动; C: 逆断层剖面示意图

断层。地壳活动带的许多断层都是走向滑动断层。走向滑动断层是在水平剪应力作用下产生的。

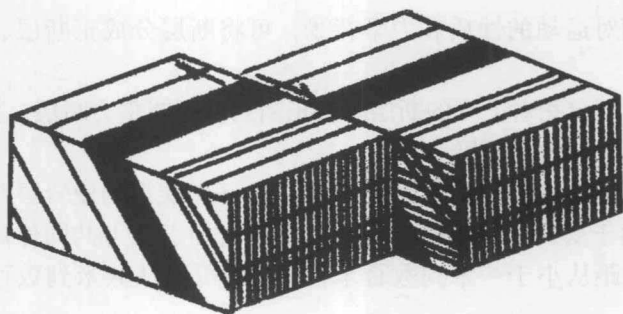


图 1-4 走向滑动断层

根据断层两盘相对运动的方向，走向滑动断层可以分为右旋走向滑动断层和左旋走向滑动断层。当观察者面对断层观察时，如果断层两盘错动方向是顺时针的，则称该断层为右旋走向滑动断层；如果断层两盘错动方向是逆时针的，则称该断层为左旋走向滑动断层。

断层滑动方向往往介于断层走向和断层倾向之间，这种断层称为斜向滑动断层（包括平移逆断层和平移正断层）。一般认为断层两盘的相对运动是平移运动，每盘上所有质点的运动方向相同，位移大小相等。如果断层两盘发生旋转运动，则上述断层分类的术语不宜直接使用。如倾斜断层两盘像剪刀那样旋转，则转轴点一侧的断层归属正断层，而另一侧归属逆断层。

图 1-5 (a) 和 (b) 分别是 1906 年 4 月美国旧金山  $M_w 7.9$  大地震导致地面上 Old Sir Francis 公路的右旋走滑错动，以及 1999 年 9 月中国台湾集集  $M_w 7.7$  大地震沿着逆断层的地面抬升的景象。

## 1.3 活动断层

### 1.3.1 活动断层的定义

在漫长的地质历史过程中，地球表面形成了许多规模不等的断层，但它们形成与活动的

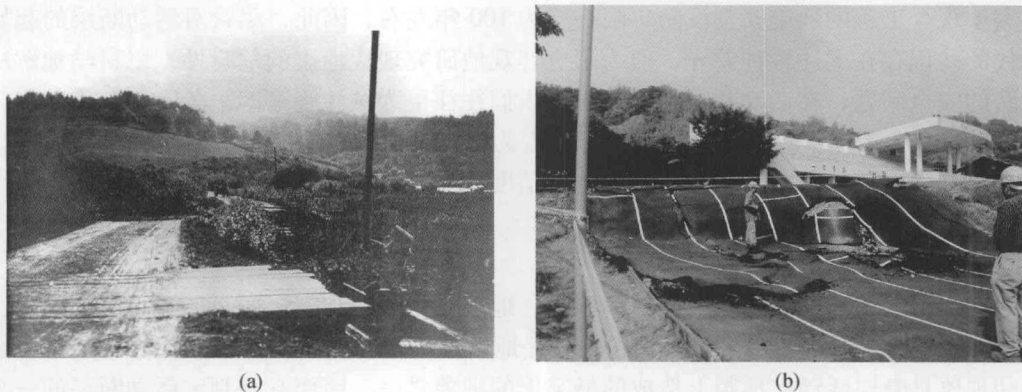


图 1-5 (a) 1906 年 4 月美国旧金山  $M_w 7.9$  大地震导致 Old Sir Francis 公路的右旋走滑水平错动 (G. K. Gilbert 摄影); (b) 1999 年 9 月中国台湾集集  $M_w 7.7$  大地震沿着逆断层的地面抬升 (Farzad Naeim 摄影)

时代不同。其中一部分断层经过强烈的滑动位移之后早已停止活动, 成为业已愈合的死断层, 不重新活动。而相当多的断层则不仅在历史上曾强烈活动过, 而且在现代构造应力场的作用下, 今后可能还会继续活动。于是, 根据断层今后是否可能活动可划分为活动断层(活断层)和老断层两大类。自从 1923 年 Willis 首先使用“活动断层”这一术语以来, 由于研究目的的不同与对断层起始活动时间认识上的差异, 致使人们迄今对活动断层的定义有所不同, 长者可达 240 万年, 短者仅有 10 万年、5 万年、甚至 1.1 万年或几千年。表 1-1 列出一些作者对“活动断层”的定义。

表 1-1 一些作者对“活动断层”的定义\*

作者	活动断层定义
华莱士, R. E	过去 1 万年或晚第四纪发生过位移的断层
艾伦, C. R	最近 10 万年或 1 万年有过活动的断层
松田时彦	第四纪或晚第四纪还活动的断层, 今后仍有可能再活动的断层
日本活断层研究会	在近代地质时期有过反复活动、将来可能活动的断层
藤田和夫	新地质时期反复活动过、将来有可能活动的断层
美国原子能委员会	在不久的将来可能活动的断层, 称为能动断层
博尼拉, M. G	在最近的过去曾活动过、在不久的将来仍可能活动的断层
丁国瑜 (1982)	第四纪或第四纪晚期以来还活动的断层, 即那些正在活动的或断续活动着的断层
国家地震局震害防御司 (1989)	第四纪期间, 尤其是晚更新世 (10 万年) 以来活动过的、并在今后仍可能活动的断层
李起彤 (1991)	现在 (即几千年以来) 仍在活动的断层

\* 汪一鹏, 1991, 关于活断层研究, 见: 国家地震局震害防御司编, 工程地震研究 (内部资料)。

鉴于现今工程的地震安全设防年限一般为 100 年左右, 因此, 尽管对活动断层的起始活动年代的认识存在上述种种差异, 但为了更客观地研究现代地震的危险性, 以科学地解决工程设防的安全问题, 在活动断层的研究中, 人们往往更为关注晚第四纪 (12 万年) 断层, 尤其是全新世 (1.2 万年) 断层的活动情况, 因为正确地估计这些断层的活动性与活动度, 常常直接影响到对未来断层活动趋势预测的可信度。

### 1.3.2 活动断层的标志

活动断层的主要标志是在第四纪地层中, 地层发生断错和断层两盘明显位移; 地形、地物被错开; 地形上形成断层崖、线状谷地和洼地以及出现断头河和水系变化等。其中, 水系的错动现象是断层活动在地貌上造成的最突出的现象之一, 因而它是判定活动断层的一个主要标志, 也是说明地壳水平运动、断层走向滑动的主要依据。

地球物理和地球化学的一些观测结果也可作为活动断层的标志。如通过地形变的观测 (定点的连续观测和不连续的重复测量) 资料, 可以确定活动断层活动与蠕动的情况; 微震的观测结果表明, 小震震中的空间分布常常沿着断层伸展; 岩层断裂破碎带往往成为地下水的良好通道, 因此沿断层地下水化学组分浓度增加; 古地震遗迹的存在, 一般也可作为活动断层的一个标志。

### 1.3.3 中国活动断层的分布

活动断层在地球表面有广泛的分布, 如美国的圣安德烈斯断层、土耳其的安纳托利亚断层、新西兰的阿尔卑斯断层 (Alpine fault)、东非裂谷、德国的莱因地堑以及俄罗斯的贝加尔湖地堑等大型断层都是世界上著名的活动断层。

中国的活动断层几乎遍布全国, 以中部的南北构造带 (约东经  $105^{\circ}$ ) 为界, 中国的活动断层可划分为两大体系, 它们分别展示在中国的西部和东部, 即特提斯—喜马拉雅活动断层体系和滨太平洋活动断层体系, 分别代表印度洋板块和太平洋板块同亚洲大陆汇聚碰撞所形成的构造应力场影响的范围。这两个断层体系内部各活动断层在延伸方向、类型、活动状态、动力来源等方面均各具特点 (丁国瑜, 1981, 1982, 1984, 2000; 马廷著等, 1991)。

其中, 特提斯—喜马拉雅活动断层体系, 系指南北地震带以西的广大地域, 其南部以东西向和向北东突出的巨型弧形断层为特征, 北部以北西、北西西和北东向断层为主。断层运动形式则以逆冲、逆掩或逆冲走滑活动为主, 部分地区以走滑为主。

滨太平洋活动断层体系, 系指中国大陆东部和黄海、东海、台湾、南海广大区域, 以北北东—北东向的张性和张性走滑断层最为发育, 兼有一系列规模较小但分布广泛的北西向和东西向的活动断层。断层运动形式一般为正断层兼走滑性质。

根据活动断层的空间展布、规模和性质等特点, 可以把中国的活动断层划分为 26 个系, 其中又分为若干断层带, 其主要结果示于图 1-6。

迄今的研究结果表明, 中国的活动断层主要有如下几个特征:

①断层的规模。中国西部的活动断层规模巨大, 一般长 300 ~ 700km, 最长可达 2000 ~ 3000km, 如阿尔金、雅鲁藏布江、班公湖—澜沧江等活动断层系。中国东部除郯庐断层系外, 其他活动断层的规模均较小, 一般长 100 ~ 300km。

中国活动断层在切割地壳深度上一般可分为超岩石圈断层、岩石圈断层和壳断层 (黄

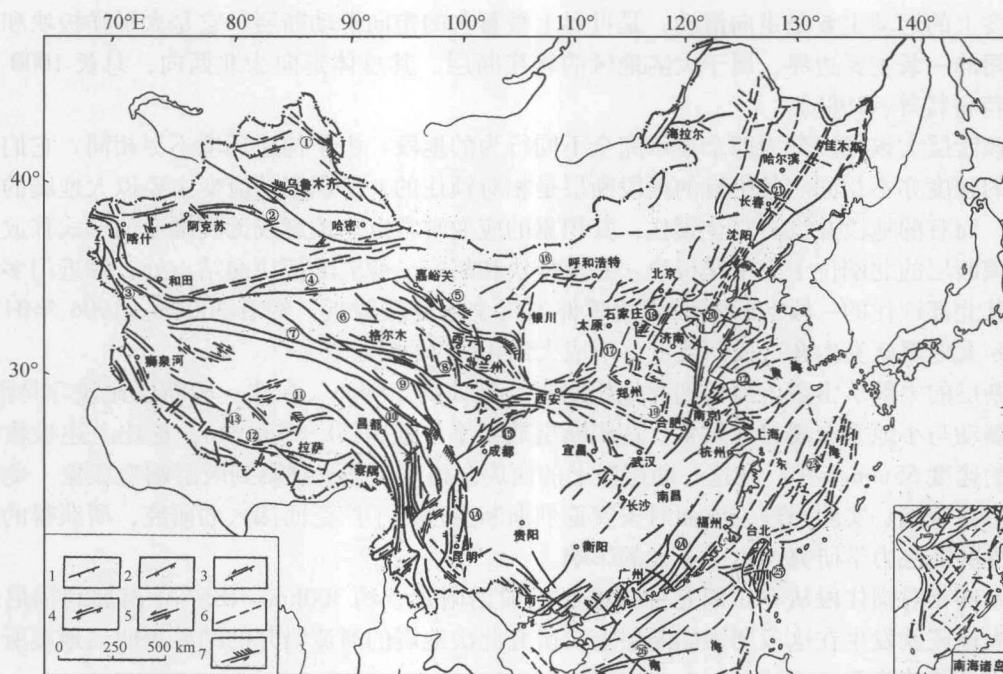


图 1-6 中国主要活动断层分布图 (刘光勋等, 1989; 《中国岩石圈动力学地图集》编委会, 1991)

1. 正断层; 2. 逆断层; 3. 平移正断层; 4. 平移逆断层;
5. 平移断层; 6. 性质不明及推测断层; 7. 地震断裂或裂缝带

汲清等, 1980), 超岩石圈断层除台湾地区的花莲—台东断层外, 其余基本都分布在中国西部, 如雅鲁藏布江、班公湖—澜沧江、金沙江—红河以及额尔齐斯河断层系等; 中国东部大部分活动断层属于壳内断层, 少数为岩石圈断层。

②断层运动的性质。中国西部的断层运动以逆冲、逆掩兼扭性为主, 有些则为走滑断层。中国东部的断层运动以张性或张扭性占优势, 局部地区或某一时期断层运动有性质的转化, 例如郯庐系晚第三纪以来运动性质就与其以前的运动性质相反, 呈右旋运动, 而第四纪也有明显的挤压性质。南黄海和东海有少数逆冲断层发育。

③断层运动的特点。中国的活动断层一般具有长期反复活动的特点, 而且在其运动发展的过程中运动性质与扭动方向发生变化。在中国东部地区中生代盆地分布广泛, 活动断层很发育, 其运动从压扭性转化为张性或张扭性的情形相当普遍。

④断层带的组成形式。在中国西部, 断层带的组成常常以单条或带状延伸和弧形断层为特征, 而在东部则以低序次的雁行排列比较发育, 如汾渭断层系和华北地区的断层最为突出。

### 1.3.4 一些世界著名的活动断层

#### 1.3.4.1 圣安德烈斯断层

圣安德烈斯断层位于美国加利福尼亚州的西海岸, 它几乎纵贯加利福尼亚州, 在其大部



分长度上的运动主要是走向滑动，是世界上最著名的走向滑动断层。它是太平洋板块和北美板块间的一条主要边界，属于大陆地区的转换断层。其总体走向为北西向，总长 1000 多千米（特科特等，1986）。

该断层大致可以分为四个显示完全不同行为的地段。由于构造环境不尽相同，它们各自活动的程度亦不相同。其中有的地段断层是相对锁住的，所积累的应变主要以大地震的形式释放；而有的地段并没有完全锁住，其积累的应变常常以小地震或无震蠕变的形式释放。

该断层的北端位于太平洋板块、北美板块和胡安·德夫卡板块交结点处，靠近门多西诺角。其北部锁住的一段从门多西诺角延伸到雷德伍德城附近，约有 300km。1906 年旧金山  $M_w 7.8$  大地震就发生在这段断层上，形成大约 4m 的地面位移。

断层的中部从雷德伍德城到乔拉姆附近，延伸约 300km。在这一段断层比较容易滑动，断层蠕动与小地震有规律地发生。这段断层蠕变率一般为  $20 \sim 30\text{mm/a}$ ，这比上述板块相对运动的速度  $55\text{mm/a}$  小。在这一断层段上的西埃奈格酒厂最早观测到断层蠕变现象。美国学者先后在观测、实验与理论方面对圣安德烈斯断层进行了广泛而深入的研究，所获得的成果对世界的断层力学研究产生了重大的影响。

南部相对锁住段从乔拉姆延伸到圣贝纳迪诺附近，约 300km。1857 年南加利福尼亚洛杉矶大地震就发生在这段闭锁的断层上，研究此次地震的河流错开的结果表明，地震所引起的平均位移约为 7m。

在圣贝纳迪诺以南，圣安德烈斯断层散开成一系列断层，在其中许多断层上发生有中小地震和断层蠕动，说明这一地段并没有完全锁住，是比较容易滑动的地段。

圣安德烈斯断层是美国一条很重要的地震带，在历史上与近代曾发生过多次大震与中等强度的地震。

#### 1.3.4.2 北安纳托利亚断层

北安纳托利亚断层与圣安德烈斯断层一样，均是世界上著名的走向滑动断层，两者曾被人称为“姊妹断层”。北安纳托利亚断层位于土耳其的北部，总体走向为东西向，其东段近于北西西向，而西段近于北东东向，大致呈向北突出的弧形，总长 1200km 左右。它是一条典型的右旋走向滑动的断层，其形成与发展同阿拉伯板块、非洲板块与欧亚板块的相互碰撞作用有关（特科特等，1986）。

北安纳托利亚断层是土耳其一条重要的地震带，其地震的强度与频度均相当高。1939 年以来，该断层上就发生了 6.8 级以上地震 10 多次，最大地震是 1939 年 12 月 26 日发生在埃尔津詹附近的 8.0 级地震。这次地震曾使北安纳托利亚断层产生了长达 362km 的破裂。尔后，在 1942 ~ 1967 年间先后又发生了 9 次强烈的地震（其中 6 次为 7 级以上地震），所产生的地表破裂几乎贯穿了整个北安纳托利亚断层带。这些先后发生的强震或大震在空间上具有明显的迁移性，总体表现为从东向西依次发生，仿佛一次地震的发生触发了下一次地震的发生。这种地震活动沿这条断层传播的特征可以归因于应力从断层发生地震的一段向相邻一段的传递。这种行为与圣安德烈斯断层的情况完全不同。

值得注意的是，在该断层的伊斯梅帕萨（Ismetpasa），位于 1944 年 2 月 1 日 7.6 级地震的地面破裂中段。这里沿北安纳托利亚断层有断层蠕变发生，在 1970 ~ 1980 年之间，断层蠕变速率接近  $10\text{mm/a}$ 。这种断层蠕变的观测结果不同于圣安德烈斯断层，后者的断层蠕变