

# 地震概论复习资料 2010 秋

By Sucre@BDWM.Music\_box

## 目录

第一章 绪论 .....	2
第二章 地震波 .....	4
第三章 地震仪及地震参数的测定 .....	5
第四章 地震机制 .....	7
第五章 地震波的传播理论 .....	10
第六章 地球内部构造 .....	15
第七章 地震预报 .....	15
第八章 宏观地震学 .....	16
第十章 汶川大地震 .....	18
第十一章 海啸 .....	19
课堂讨论：地震次生灾害——水灾 .....	20

## 第一章 绪论

- 四大起源问题

行星、地球、生命、人类

- 宇宙演化

秒差距 (parsec, pc): 1 个 Au (天文单位, 即日地平均距离) 的弧长所对圆心角为 1 秒时, 圆半径的长度为 1 pc。

$$1pc = 1Au \frac{360^2}{2\pi} \approx 3.26 \text{光年}$$

周年视差: 太阳 S-恒星 T-地球 E 所成的角度  $\angle STE = n$  秒。恒星与地球的距离  $= 1/n$  pc。

宇宙是有限无边的 (就像地球有限, 但沿表面走走不到尽头, 会回到起点), 有起源, 无中心, 会灭亡。

- 太阳系

九大行星: 水、金、地、火、木、土、天王星、海王星、冥王星。

固体, 类地行星

表面非固体, 类木行星

主要元素: 金属及 Si

主要元素: H, He 等。

体积小, 密度大, 卫星少

体积大, 密度小, 卫星多

行星轨迹特性: 近圆性, 共面性, 同向性。

计算推测地球与木星之间有一颗大行星, 实际只存在一个小行星带, 可能是木星质量大, 且为气态表面, 木星与太阳的引力作用使本该存在的行星被粉碎。

太阳核心的光子运动到表面需要 1 百万年。

黑子是太阳表面温度低的区域。

冥王星被排出 9 大行星的原因: 星体为固体, 密度大 (与类地行星相似), 轨道与海王星交织, 不能清除其轨道附近的其他物体, 体积不够大 (主要)。行星的三要素: 绕恒星公转, 质量足够大, 自身引力使其保持近圆形, 能清除轨道附近的其他天体。

- 地球的演化

能量来源: 主要是引力势能和放射性衰变能。

- 地球科学的框架

固体地球科学 (地质学、地球物理学、地球化学、大地测量学), 大气科学, 土壤科学, 海洋科学, 环境科学。

地球物理学 (广义) 的研究领域:

地震学

地球电磁学与古地磁学

重力与大地测量

地球动力学

构造物理

空间物理学-----

固体地球物理学

地球物理学

大气科学  
海洋科学  
水文学  
行星科学（比较行星学）

- 地学发展史

火成论（Hutton 赫顿）：地质现象的主要动力是地下热火。地球内核为熔融状态，火山喷发后，岩浆冷却形成岩石。岩石固化及海洋上升成为陆地是地热（能）的作用。

水成论（Werner 魏尔纳）：水对地表的改变起决定因素。岩石层的连续性，分带性由水造成，水面下降，岩石露出水面进而风化、堆积形成岩层。

灾变论（Curvier）：地球上的绝大多数变化是突然、迅速和灾难性地发生的。例如，海洋干涸成陆地，陆地又隆起山脉，火山爆发等。为解释古生物的灭绝且不违背圣经而提出。（现在的观点认为灾变说是正确的）

均变论（C. Lyell）：地质变化主要由“微弱”的地质作用力（大气水、风、河流、潮汐等）引起，这种作用力始终保持基本相等的速率和强度。

固定论（J.D. 丹纳）：地壳运动以垂直运动为主，几乎没有水平运动。

活动论：地壳运动以水平方向为主，魏格纳 1915 年提出的大陆漂移学说→海底扩张说→板块构造说。

大陆漂移说：中生代以前地球上所有大陆连在一起，称为泛大陆，后因地球自转（向西的潮汐力和向赤道的离极力）轻质硅铝层漂浮于硅镁层之上，各板块才分裂并漂移。

海底扩张说：大洋底部裂缝中的地幔物质上升，形成新的洋壳，并挤压裂谷两侧的地壳向外推移，至大陆因受阻而插入地幔，达到平衡。

板块构造说：地幔软流层相当于传送带，通过对流作用使大陆板块在其上运动。

- 地震学

研究地震及其相关现象，属于地球物理学的一个分支。

内容：研究固体地球介质中地震的发生规律、地震波的传播规律、地球内部构造及地震的宏观后果等。

- 地震学的贡献

理论：板块构造理论，地球内部构造，地球动力结构，地球动力学，行星科学

方法：反演理论及方法，（弹性波）波动理论，成像方法，复杂性科学。

对社会发展：预防与减轻自然灾害，资源与能源探测，考古，工程建设，国防安全，反恐。

- 古代地震学

最早的地震记录：公元前 1831 年，山东泰山地震

古代关于地震成因的解释——

①希腊的“气动说”：风被封闭在地壳内，风的力量（风行至狭窄处，速度和力量增大）使地壳运动形成地震。代表人物亚里士多德，有一定科学依据。

②中国的阴阳论：天为阳，地为阴，“地动者，阴有余也。”联系政治，东方色彩重，缺乏根据。康熙为堵“天诫说”，结合西方气动说与中国阴阳论对地震作了解释。张衡——政善则休祥降，政恶则咎征见。

③日本地震鲶传说：地球靠一条大鲶鱼支撑，鲶鱼巨动则地震生。

- 二十世纪的地震学

作为独立的学科出现，地震仪出现和广泛使用。1910 年 Reid（里德[美]）提出弹性回跳理论。60~70 年代，地球自由震荡，震源物理，大陆漂移、海底扩张、板块构造说，地震预报。

## 第二章 地震波

- 地震波传播理论

地震波与光波、电磁波相似，有反射、透射、衍射和散射等现象，满足惠更斯原理和费尔马原理。但控制地震波传播的最基本原理是牛顿定律。

地震波的费尔马原理（Fermat Principle）：地震波在介质中的传播路径为走时最小的路径。地震学中的费尔马原理是地震波在高频情况下的波动方程的近似解。高频近似：地震波的特征波长远小于研究问题的特征尺度。高频近似条件不满足时，只能严格求解波动方程。

- 地震射线

能量束的能量呈高斯分布，宽度  $d$  与频率  $f$  呈反比，当  $f \rightarrow +\infty$  时， $d \rightarrow 0$ ，能量束即成为“射线”。地震射线就是地震波高频近似的表述。

地震波波长：数百米至数千米。

- 地震波

（一）体波

体波分纵波（P 波，Primary wave）和横波（S 波，Secondary wave），纵波传播比横波快，一般  $V_p \approx \sqrt{3}V_s$ ，地震记录上总是 P 波先到达，所以地震时先感觉到上下振动，后感到左右摇晃。S 波可分解为平行于界面的 SH 波，和处于入射线与法线所在平面的 SV 波。

无限、各向同性的均匀弹性介质中只有 P 波和 S 波。液体中因无切变，只有纵波。

（二）面波

面波在半无限，各向同性的均匀弹性介质或成层介质中出现，沿着与界面平行的方向传播，在与界面相垂直的方向上，波动振幅急剧衰减。面波的能量分布呈简正振型，传播速度随周期改变（此现象称为频散），周期增大速度也增大为正频散，周期增大速度减小为反频散。

面波分瑞利波（Rayleigh wave，R 波）和勒夫波（Love wave，Q 波），R 波是 P 波和 SV 波干涉的结果，质点轨迹是与波行方向垂直的平面内（这里的平面方向是平面的法线方向）的逆行椭圆。Q 波与 SH 波相似，是 P 波与 SH 波干涉的结果，是层状介质覆盖于较高速度的半空间时产生的。在记录中有可能把勒夫波与瑞利波区分开。在半无限的均匀介质中，不产生勒夫波，产生的瑞利波无频散，地震中出现勒夫波和瑞利波说明地下介质不均匀或为层状。面波周期越大，渗透深度越大。

（三）地震波的波序

杂波-P 波-S 波-勒夫面波-瑞利面波。

（四）地质构造对地震波的影响

地震波的放大效应：唐山地震时，矿井中的工人感觉到的摇动比地表人们感觉到的小许多，原因是 S 波从深部震源垂直向上传播，入射波和反射波在地表叠加，使近地表的波幅增大。建筑在土壤上的建筑物容易被震坏也是因为波的放大和增强作用。

● 地球的自由振荡

机械系统受外力作用而失去平衡状态，当外力撤去后，系统产生的振动即自由振荡。地震可使地球产生自由振荡。自由振荡是驻波，在任意给定时刻内发生运动的是地球的整体，随时间变化，而不随时间进行。体波和面波是行波，即在任意时候内发生运动的只是地球的一部分，随时间进行。自由振荡的周期比体波和面波长。

地球的自由振荡分球型振荡（S 振型）和扭转型振荡或环型振荡（T 振型），T 振型中，质点只在球面上做前后振动，而 S 振型中质点同时进行前后振动和径向振动。

自由振荡存在频散现象，影响自由振荡周期的因素有：地球自转及横向非均匀性。

● 体波与面波的比较：4 种波的简图见讲义第 16 页

	体波		面波	
名称	纵波 (Primary wave)	横波 (Secondary wave)	瑞利波 (Rayleigh wave)	勒夫波 (Love wave)
简称	P 波	S 波	R 波	Q 波
分量		SH 波：与界面平行 SV 波：与界面垂直		
产生条件	所有介质		半无限均匀弹性介质（无频散）；层状介质（有频散）。实质为 SV 波和 P 波干涉的结果	层状介质。实质为 P 波与 SH 波干涉的结果
传播速度	快，与周期无关		慢，与周期有关（存在频散现象）	
传播距离	近		远	
振幅	小		大	
周期	小		大	
频率	高		低	
衰减速度	快		慢	

第三章 地震仪及地震参数的测定

● 张衡的候风地动仪

实际只能测定发生地震的大致方向（比如正东、正西），并不能确定发震地点，更不能预报地震。利用的是杠杆原理。公元 138 年在洛阳记录到陇西的一次地震。

● 现代地震仪

1. 测量时放在深处的岩石层，而非地表土壤层。原因是土壤层松软，测定结果不准。
2. 利用了悬挂重物保持静止的惯性记录地震位移，底下的尤因板均匀转动，记录下的曲线叫地震图或地震记录。地表振动方向分：东西，南北，上下（相当于 XYZ 轴，右手定则），同时记录三个分量可测出震源位置。
3. 第一个远震记录：德国 Postdam 记录到日本发生的地震。
4. PP 波表示 P 波反射产生的 P 波，PS 波表示 P 波反射产生的 S 波，PPP、PPS、SS 类似。

● 地震台

我国自己创建的最早地震台：鹫峰地震台。

全球地震台网 GSN (Global Seismic Network)：为研究地球构造与地震而设立的极高质

量的标准地震台。

地震台初建时，设在天文台附近，因为天文台能确定更准确的时间。

### ● 地震带

地震集中分布的带，主要受地质构造所控制。

全球地震带：①环太平洋地震带（最大，[唐山][台湾]），②欧亚地震带（[汶川]），③洋中脊地震带。全球约 85% 的浅源地震和几乎所有中源、深源地震发生在①②两个带。

我国多震地区：四川、云南、新疆、西藏、台湾。

### ● 地震强度

震级：表示地震本身的大小，只与释放的震动能量  $E$ （单位：尔格，1 尔格= $10^{-7}$ J）有关， $\lg E = 11.8 + 1.5M$  ( $M$  为面波震级)，可通过地震波的振幅、周期及震中距计算。震级相差 1，能量相差约 32 倍，这里的能量是总能量，是以矩震级计算的，按里氏震级  $M = \log A, E = \frac{1}{2}KA^2$  震级相差 1，振幅相差 10 倍，能量相差 100 倍，这只是地震波的弹性势能部分。震级本身没有上下限。

烈度：与地震本身大小、观测点距离、土质情况、建筑物类型等都有关。

### ● 震源和震中

地震发生的地点即震源，震源不是一个点，而是一个区域，称震中区。震源在地球表面的投影叫震中。震源深度为  $h$ ，浅源地震  $h < 70 \text{ km}$ ，中源地震  $70 \text{ km} < h < 300 \text{ km}$ ，深震  $> 300 \text{ km}$ 。破坏性大的一般是浅源地震。我国大陆主要发生浅源地震。

### ● 地震定位

确定震中的方法：①三点法：三个地震台  $ABC$  分别记录  $S$  波， $P$  波到达的时间，用

$\frac{S_i}{v_s} - \frac{S_i}{v_p} = \Delta t$  算出地震台的震中距  $S_i$ ，以  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为圆心  $S_i$  为半径作圆，三圆交点即震中。

②用  $P$  波到达时间  $t_i$  估算：半径  $R_i = V_P(t_i - t_0)$ ，用不同的  $t_0$  多次调整，使三圆交于一点即可。

③单台三分量确定震源和震中：东西、南北二分量确定震中方向，用  $S$  波、 $P$  波时间差确定震中距；东西、南北分量的和与三分量的和夹角  $\beta$  确定震源方向，结合震中距确定震源位置。

注意：三个数据必需来自不同方向和不同距离的 3 个台站！

### ● 地震大小

里氏震级  $M_L$ ：震中距为  $100 \text{ km}$ ，最大地震波振幅（单位：1%毫米）以 10 为底的对数。振幅为  $1 \text{ cm}$  时， $M_L = 4.0$ 。标度图：左震中距，右最大振幅，二者连线与中间线交点即里氏震级。 $M_L$  没有限定地震波的类型，只适用于近距离地震和小地震。汶川地震为 8.0 级，按此计算方法，得振幅为  $100 \text{ m}$ ，明显不可能。

面波震级  $M_S$ ：用面波计算得到，适用于远距离地震，但不能用于深源地震（深源地震不能激发显著的面波）。

$P$  波震级  $M_b$ ：适用于深源、浅源、远距离地震。

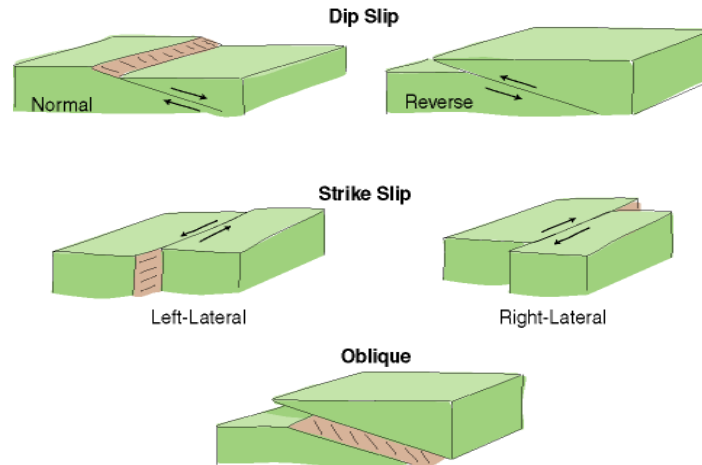
矩震级  $M_w$ ：前面的震级没有直接衡量震源的全部机械能， $M_w$  考虑了所有波形，在识别地震能量大小上更可靠。

- 地震加速度的测量  
近震、强震，工程建设及地震信息完整性的需要。

#### 第四章 地震机制

- 应力  
单位面积上受到的力，与作用面的方向有关。单位  $\text{N/m}^2 = \text{Pa}$ ,  $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ 。  
物质受应力引起的变化：变形（弹性体）、流动、断裂。
- 应变  
介质受应力后产生的形变，有剪切形变和体积形变，无量纲，发生应变时，介质中储存能量（如弹性势能）。例子：取一段 5cm 长的胶带，拉长到 6cm，则应变为：应变 =  $(6\text{cm} - 5\text{cm}) / 5\text{cm} = 0.20$  or 20%。  
运动的板块把弹性势能储存在断层附近的岩石中，应变的岩石把应力施加在断层上。
- 岩石变形  
岩石变形的类型主要依赖于：组合成份、温度、压力、应变率。  
变形结果：①冷的脆性岩石→脆性破裂（断层）→天然地震；②地球深部的高温岩石→弯曲或流动。
- 岩石行为  
一般情况下，处于应力状态的岩石或者流动或者发生破裂，主要取决于温度。  
岩石在破裂前能够承受一定程度的应变（应变能），当应力撤销时，岩石又恢复到原先的状态，这时岩石的表现叫弹性体。
- 岩石破裂：断层和结合  
结合：破裂面的两边未发生相互移动。  
断层：破裂面的两边发生相互移动。断层开始滑动的地方即震源。
- 断层相关的术语  
断层上盘：位于断层面之上。  
断层下盘：位于断层面之下。  
倾角：断层面与地球表面的夹角，范围  $0^\circ \sim 90^\circ$   
走向：站在断层的地表面上，上盘在你的正右方，你所面对的方向为走向方向。断层面和地表的交线的走向方向与正北的顺时针夹角叫断层的走向；范围为： $0^\circ \sim 360^\circ$ 。  
滑移：断层的上盘相对于下盘滑动的方向。
- 断层的类型：取决于断层的滑移方向  
正断层：上盘相对于下盘向下滑动。  
逆断层：上盘相对于下盘向上滑动。  
走滑断层：两盘只在水平方向上发生相对滑动。站在断层的一侧看，如果另一侧向左移动，即为左旋走滑，如果向右则为右旋走滑。  
斜滑断层：水平和垂直方向上都发生移动。





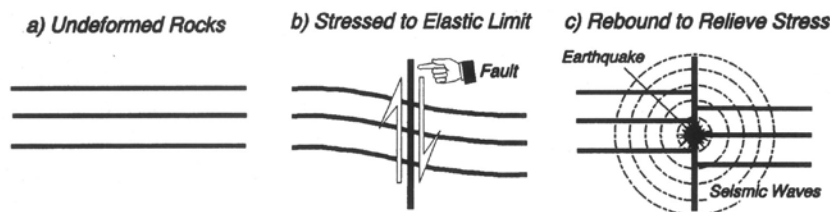
### ● 应力和断层

断层面上，应力超过其摩擦力时断层发生滑动

三种主应力作用在断层上 (→ ↓ ←)。如果垂直压应力 { 最大—正断层  
最小—逆断层  
中等—走滑断层

### ● 弹性回跳模型

由于构造板块之间的相对运动，锁住的断层受到应力的作用，断层附近的介质发生变形，并蓄积着应变能。较弱的地方开始发生微破裂（地震前兆），当应力超过一定的限度时，断层开始破裂并释放应力。这就是主地震。当断层周围的介质释放储藏的弹性能的时候，断层介质作断裂回跳，到达新的平衡点。弹性回跳不是一次性全面完成的，未完成回跳的地方应力继续增加。陆续完成的回跳和调整形成一系列余震。



### ● 板块构造学说

板块：刚性（或半刚性）固态的巨大板状岩石块体。

**板块构造：**地球最外层由若干大小不等的岩石板块组成（岩石圈），它们飘浮在相对较软流动的软流圈上作相互运动。

**固定论（垂直运动说）：**海洋终归是海洋，大陆终归是大陆，海陆的发展和地球上部的运动以垂直运动为主，水平运动是次要的。不能解释的问题：①阿尔卑斯—喜马拉雅山大规模的颠覆构造；②太平洋西部的弧状岛屿及岛弧后的边缘海盆地；③恐龙化石几乎遍布世界各大陆；④南极大陆储存有煤；⑤酷热的非洲有冰川的痕迹。

**大陆漂移说：**1915年魏格纳提出，证据：①形状复杂的板块拟合（用大陆架）；②化石证据，不能渡洋的动植物化石在隔海的板块都存在；③大西洋两岸的岩石组成、年龄和地质结构相似；④大西洋两岸大陆连在一起，北美洲和欧洲连在一起时，地质现象有连续性；④古气候数据：现今的非热带地区有热带气候的证据，现今的非沙漠地区发现低纬度才有的干旱沙漠证据，现今的热带气候地区发现冰川的证据。面临的问题：大陆漂移的力学机制？月



亮潮汐，大陆穿过海洋地壳---Wegner。

海底扩张说：大洋底部裂缝中的地幔物质上升，形成新的洋壳，并挤压裂谷两侧的地壳向外推移，至大陆因受阻而插入地幔，达到平衡；大陆随着海洋一起漂移。提出依据：军事需要对海底的探测，发现海床岩石年轻（不超过 3 亿年），海床不平，存在海岭和火山，地磁极多次反转，海底地磁条带沿大洋中脊对称分布，地震和火山多分布在海沟和海岭。

- 地球结构

由内到外：地核、地幔、地壳。外部冷而坚硬，上地幔软流层熔融，外核呈液态。

- 七大板块

印度-澳大利亚板块、太平洋板块、北美板块、南美板块、欧亚板块、南极板块、非洲板块。

- 板块边界类型

扩散边界：新的地壳在此产生。大西洋中脊，东非裂谷。

汇聚边界：地壳在此消失（消减带）。洋陆碰撞：海沟；特点：火山弧，陆壳迅速隆起，深源地震。洋洋碰撞-特点：火山弧，岛弧，大的深源地震。陆陆碰撞-特点：两者都不消减；褶皱隆起；形成高原。**青藏高原**：原属南方古大陆，由印度板块北移，撞击欧亚板块形成（喜马拉雅山也是）；影响：挡住北上的印度洋暖气流，使中国西北部干旱，西伯利亚南下的风沙被挡下，形成黄土，大气环流改变，东南和西南季风加强，长江中下游温暖湿润、物产丰富。

转换边界：由于扩散边界的扩散速度差异而产生的走滑断层，板块之间在此作相互水平运动。把两扩散边界（大洋中脊）连在一起，多在海洋，形成浅源地震。

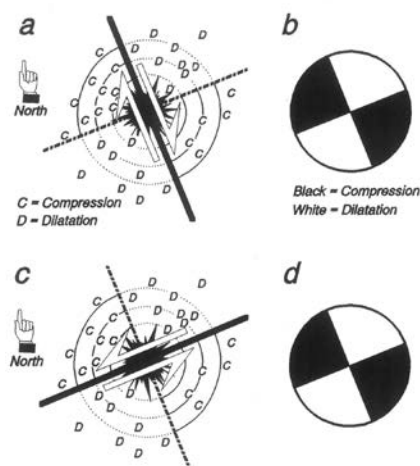
板块边界区域一有一定宽度的带，没有清晰的板块边界，相互作用不清楚。

- 地幔热柱

解释了发生在板块内部的火山，如夏威夷火山。夏威夷火山链：固定的地幔热柱与板块运动造成。

地幔对流假说：板块漂移的动力来自地幔对流，能量来源是放射性元素的衰变和地球演化中的残余热量（重力作用）。

- 震源辐射图案



- 地震分类

天然地震 { 构造地震 90%  
火山地震 7%  
陷落地震 3%

非天然地震 { 水库地震：震区在库区附近或下游，最大水库地震 1962 年新丰江 6.4 级  
地下核爆

- 鉴别地下核爆的方法

震中位置和震源深度（天然地震要深得多）。

波形复杂性。

初动解。地表测量：地面全部被上推（一片黑）。

地震波频谱。

震级比  $m_b:M_s$

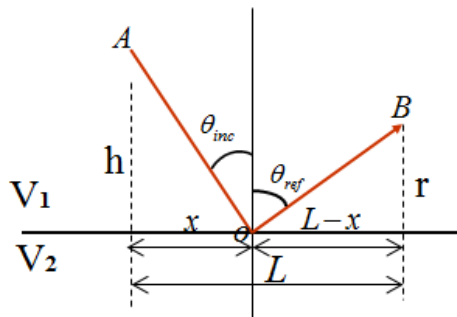
## 第五章 地震波的传播理论

- 地震波传播理论

地震波满足惠更斯原理和费尔马原理，但最基本原理是牛顿定律。地震学中的费尔马定理：地震波在介质中的传播路径为走时最小路径。前提：高频近似（地震波特征波长  $\ll$  研究目标的尺度）。

- Fermat 原理在地震学中的应用

Snell 定律 1:



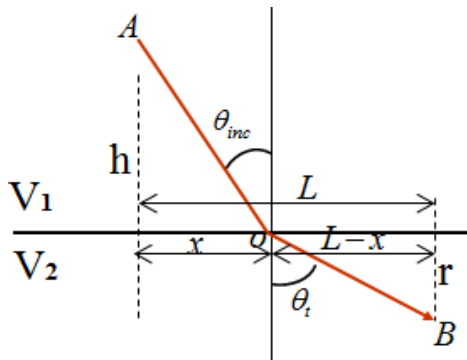
$$t(x) = \frac{1}{V_1} \left\{ \sqrt{h^2 + x^2} + \sqrt{r^2 + (L-x)^2} \right\}$$

Fermat 原理：反射点使最小

$$\rightarrow 0 = \frac{dt(x)}{dx} = \frac{1}{V_1} \left\{ \frac{x}{\sqrt{h^2 + x^2}} - \frac{(L-x)}{\sqrt{r^2 + (L-x)^2}} \right\}$$

$$\rightarrow \sin(\theta_{inc}) = \sin(\theta_{ref})$$

Snell 定律 2:



$$t(x) = \frac{1}{V_1} \sqrt{h^2 + x^2} + \frac{1}{V_2} \sqrt{r^2 + (L-x)^2}$$

Fermat 原理：折射点使最小。

$$\rightarrow 0 = \frac{dt(x)}{dx} = \frac{1}{V_1} \frac{x}{\sqrt{h^2 + x^2}} - \frac{1}{V_2} \frac{(L-x)}{\sqrt{r^2 + (L-x)^2}}$$

$$\rightarrow \frac{\sin(\theta_{inc})}{V_1} = \frac{\sin(\theta_r)}{V_2}$$

- 射线参数

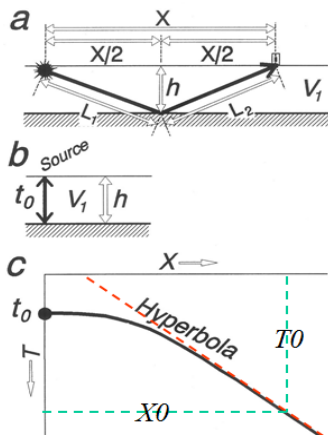
$\frac{\sin(\theta_{inc})}{V_1} = \frac{\sin(\theta_r)}{V_2} \equiv p$  (射线参数), 对给定的射线,  $p$  在传播过程中不变。  $\theta_r = 90^\circ$  时,

$$\sin \theta_{inc} = \frac{V_1}{V_2} (V_2 > V_1), p = \frac{\sin \theta_{inc}}{V_1} = \frac{1}{V_2}$$

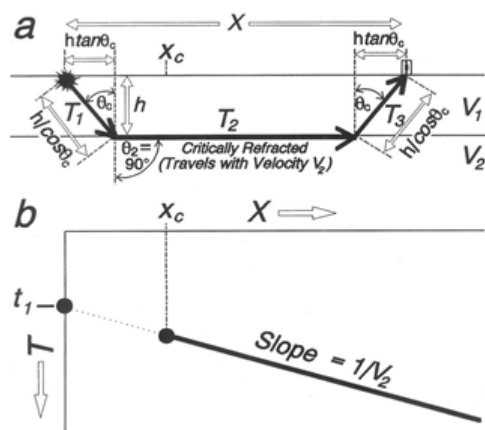
- 反射波、首波、直达波

1. 反射波(Reflected wave):  $T(X) = \frac{2}{V_1} \sqrt{h^2 + (X/2)^2}$ , 其中  $t_0 = T(X=0) = \frac{2h}{V_1}$ ,

$$\frac{dT}{dX} = \frac{(X/2)}{V_1 \sqrt{h^2 + (X/2)^2}} \rightarrow \frac{1}{V_1} (x \rightarrow +\infty)$$



反射波

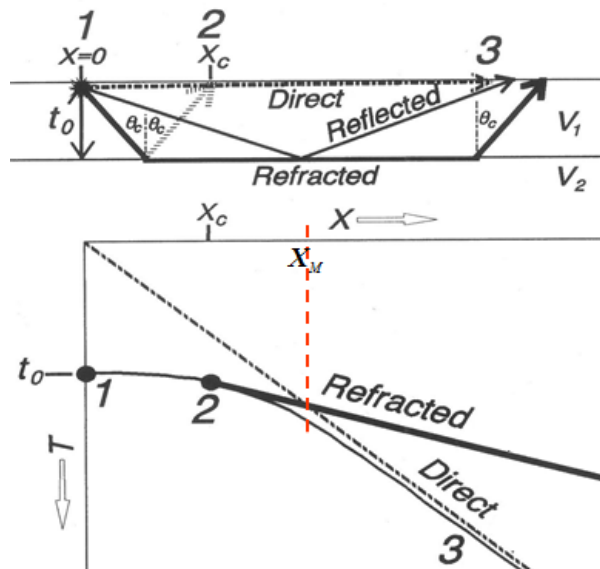


首波

2. 首波(Refracted wave):

$$T(X) = \frac{2h}{V_1 \cos(\theta_c)} + \frac{X - 2h \tan(\theta_c)}{V_2} \text{ for } X > X_c, \text{ where } X_c = 2h \tan(\theta_c)$$

$$\frac{dT}{dX} = \frac{1}{V_2}$$



三种波的比较：注意曲线交点及渐近线。

作业题：X<sub>M</sub>的存在性，及波型转换时的 Snell 定律。

- 多层介质中地震波走时方程（要求）

$$p = \frac{\sin(i_1)}{V_1} = \frac{\sin(i_2)}{V_2} = \dots = \frac{\sin(i_n)}{V_n} = \dots = \frac{\sin(i_N)}{V_N} \rightarrow \sin(i_n) = pV_n$$

$$\Delta x_n = h_n \tan(i_n) = h_n \frac{\sin(i_n)}{\cos(i_n)} = h_n \frac{pV_n}{\sqrt{1-(pV_n)^2}};$$

$$\Delta t_n = \frac{h_n}{V_n \cos(i_n)} = \frac{h_n}{V_n \sqrt{1-(pV_n)^2}}$$

$$X(p) = 2 \sum_{n=1}^N \frac{pV_n h_n}{\sqrt{1-(pV_n)^2}} (\text{对称反射, 故乘2})$$

$$T(p) = 2 \sum_{n=1}^N \frac{h_n}{V_n \sqrt{1-(pV_n)^2}}$$

- 垂直连续变化的介质中地震波走时方程（不要求）

$$X(p) = 2 \int_0^{x_h} dx = 2 \int_0^H \frac{pV(z)dz}{\sqrt{1-[pV(z)]^2}} (\text{对应}) dz$$

$$T(p) = 2 \int_0^{T_h} dt = 2 \int_0^H \frac{dz}{V(z)\sqrt{1-[pV(z)]^2}}$$

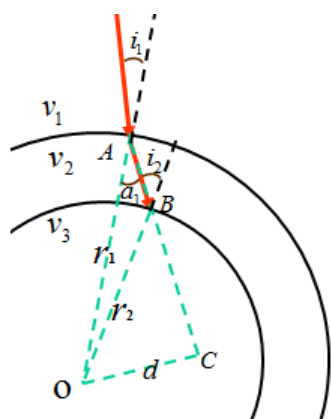
已知  $V(z) = V_0 + az$

$$\text{当时} p \rightarrow 1 \quad z_p = \frac{(1-pV_0)}{ap} \sin[\theta(z_p)] = 1 \quad \theta(z_p) = 90^\circ$$

$$\text{故} t(p) = 2 \int_0^{z_p} \frac{dz}{V(z)\sqrt{1-[pV(z)]^2}} \rightarrow T(X) = \frac{2}{a} \ln \left( \frac{1}{pV_0} + \frac{aX}{2V_0} \right)^2$$

$$X(p) = 2 \int_0^{z_p} \frac{pV(z)dz}{\sqrt{1-[pV(z)]^2}} \rightarrow \left( x - \frac{V_0}{a \operatorname{actg}(\theta_0)} \right)^2 + \left( z + \frac{V_0}{a} \right)^2 = \left( \frac{V_0}{a \cos(\theta_0)} \right)^2$$

- 球对称介质中的 Snell 定律（不要求？）



$$\frac{\sin(i_1)}{v_1} = \frac{\sin(a_1)}{v_2} + d = r_1 \sin(a_1) = r_2 \sin(i_2)$$

$$\rightarrow \frac{r_1 \sin(i_1)}{v_1} = \frac{r_1 \sin(a_1)}{v_2} = \frac{r_2 \sin(i_2)}{v_2}$$

$$\rightarrow \frac{r_1 \sin(i_1)}{v_1} = \frac{r_2 \sin(i_2)}{v_2} \equiv p (\text{与垂向变化介质中不同})$$

- 球对称介质中地震波的走时方程（不要求）

$$p = \frac{r \sin[i(r)]}{v(r)} \rightarrow \sin[i(r)] = \frac{pv(r)}{r}$$

$$\rightarrow \cos[i(r)] = \frac{1}{r} \sqrt{r^2 - [pv(r)]^2}$$

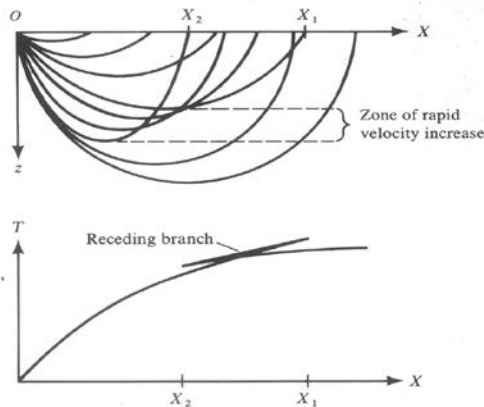
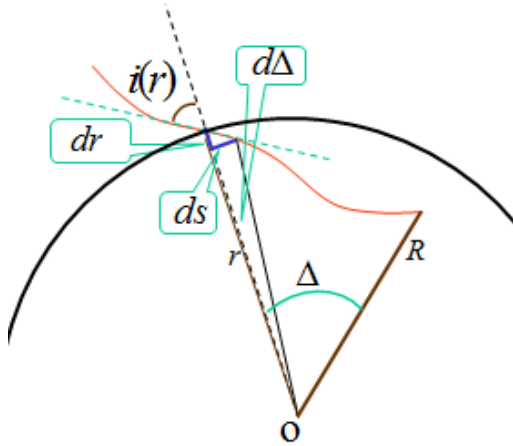
$$\rightarrow \tan[i(r)] = \frac{pv(r)}{\sqrt{r^2 - [pv(r)]^2}}$$

$$dt = \frac{dr}{v(r) \cos[i(r)]} = \frac{r dr}{v(r) \sqrt{r^2 - [pv(r)]^2}}$$

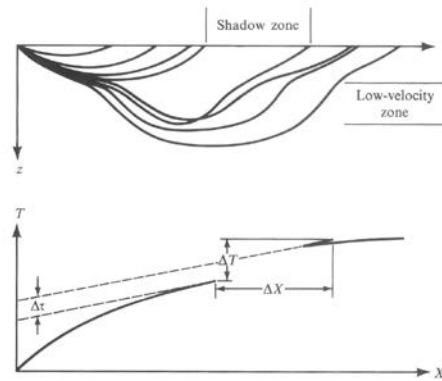
$$\rightarrow t(R, p) = \int_{r_a}^R \frac{r dr}{v(r) \sqrt{r^2 - [pv(r)]^2}}$$

$$d\Delta = \frac{ds}{r} = \frac{dr \tan[i(r)]}{r} = \frac{pv(r) dr}{r \sqrt{r^2 - [pv(r)]^2}}$$

$$\rightarrow \Delta(R, p) = \int_{r_a}^R \frac{pv(r)}{r \sqrt{r^2 - [pv(r)]^2}} dr$$

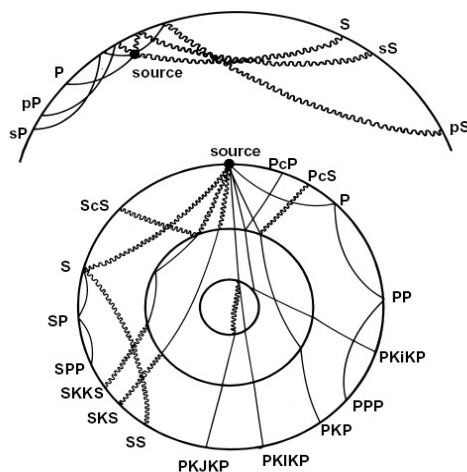
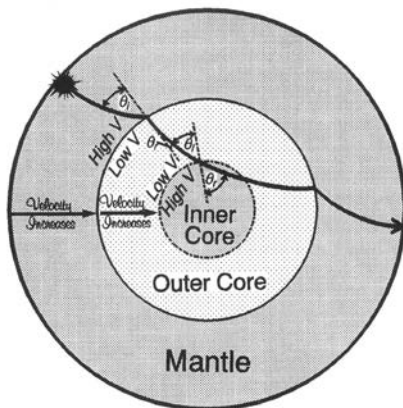


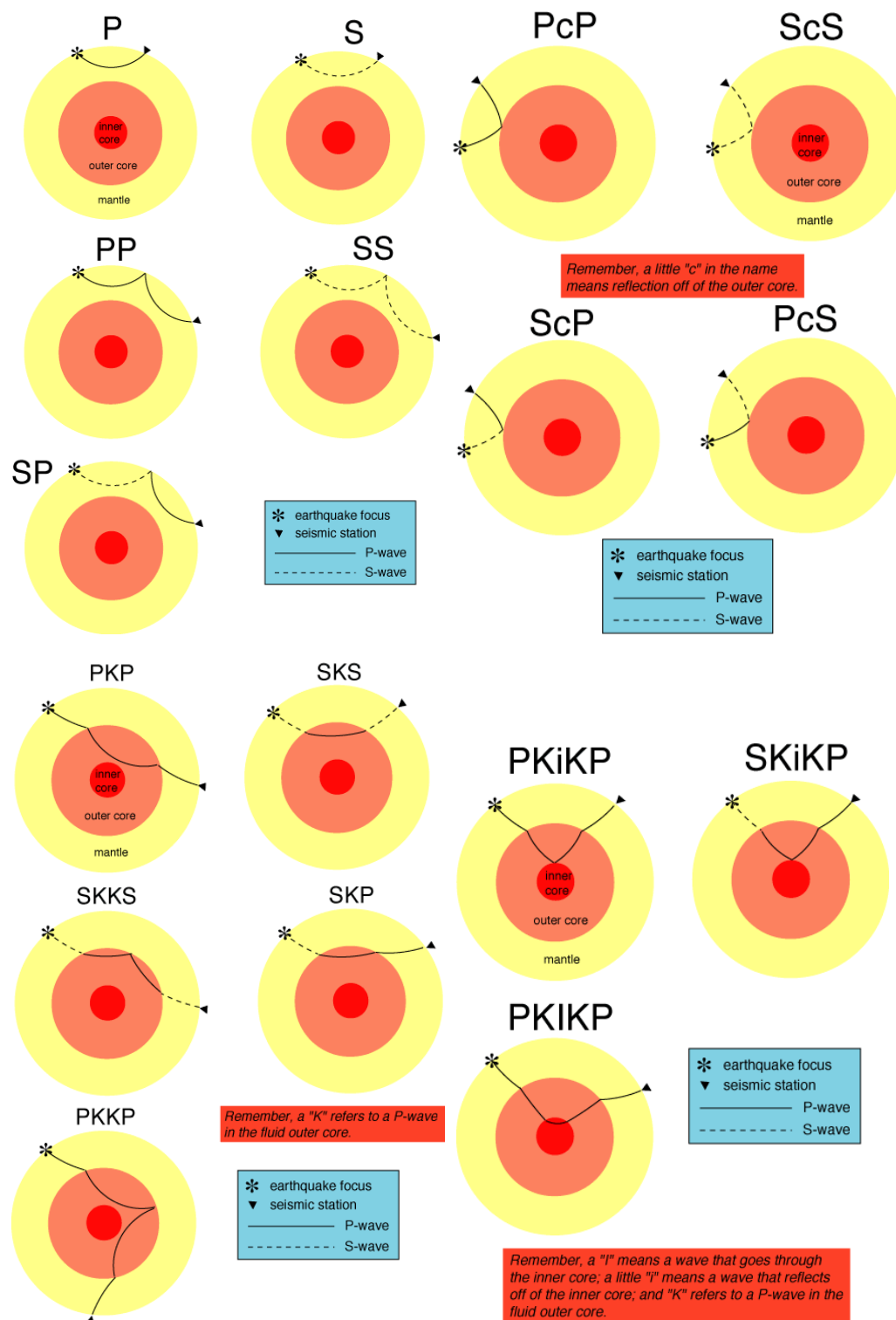
▲ 介质存在**高速层**时地震射线的时距曲线



▲ 介质存在**低速层**时地震射线的时距曲线

- 地球内部构造及地震射线





P/S: 从震源经地幔到达地表的纵/横波

p/s: 从震源沿地表行进的波

K: 通过外核的 P 波（外核为液态，故只有 P 波，无 S 波）

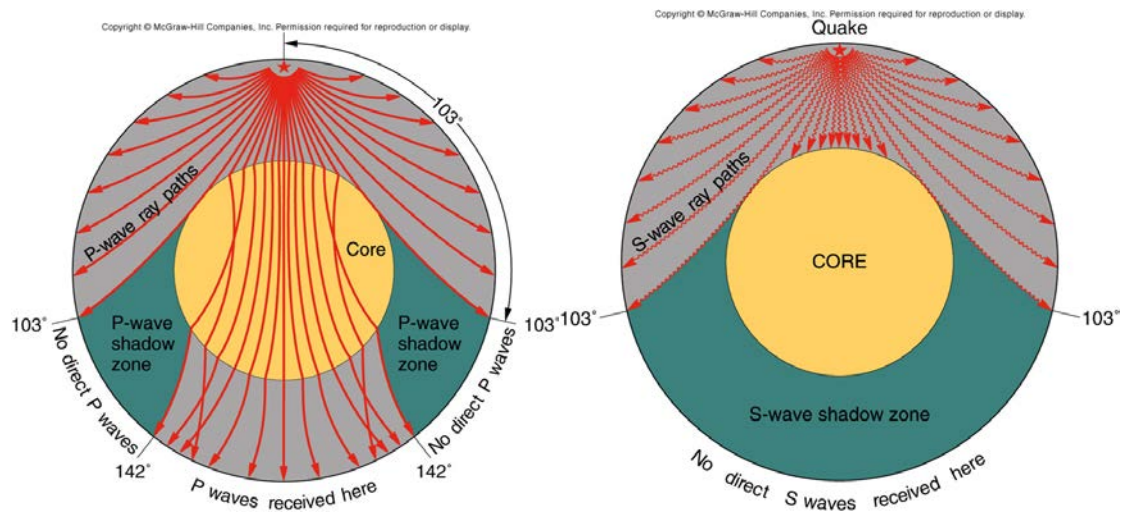
c: 波在外核表面发生反射

I: 通过内核的 P 波

J: 通过内核的 S 波

i: 波在内核表面发生反射

● P/S wave shadow zone



第六章 地球内部构造

			构成	地震波速	深度 h/km
地壳			固体岩石	正常	0~33
地幔	上地幔	非地壳岩石圈	固态	莫霍面 P 波速度陡增	莫霍面~150
		软流层	放射性元素集中, 蜕变放热使岩石软化→岩浆?	存在低速区	150~670
	下地幔		可塑性固态物质, 硅酸盐, 金属氧化物, 硫化物	正常	670~2780
过渡层（古登堡面）			固态（低速）	P 波速度陡降	2780~2885
地核	外核	液态	低速	2885~5155	
	内核	固态	正常	5155~6371	

第七章 地震预报

● 地震预测

基于地震重复返回周期分析, 精度低 (原因: 破裂不会按照严格的时间表进行, 只有重复的返回周期包络; 应变能可能在一次大的地震中释放, 也可能分若干次小地震慢慢释放)。

依据: 活动断层或断层段破裂不是随机的 (至少有返回周期包络), 特征周期反映了沿断层区域的应变能积累, 以及断层或断层段承受应变的能力。

例子: 圣安德烈斯断层, 1906 年地震 (8.25 级) 前的 50 年, 断层位移 3.2 m, 发生地震后, 断层位移 6.5 m, 积累应变需要的时间  $6.5/3.2 \times 50 = 100$  年, 即下一次重复发生这样大地震需要的时间。假设前提: 均匀积累应变, 断层性质在地震中不改变。运用条件: 有大量地震历史资料。

● 地震空区

有地震倾向、地震能量的释放低于平均水平的区域。(将来有可能成为强震区域)



- 地震预报

三要素：地震发生的时间，地点，强度。

依据：物理参数的明显变化，地震前兆：地震波波速的变化，地壳变形，地下水变化，气体释放，大气效应，动物行为异常，岩石电磁性质的改变。

- 地震预报的发布

地震预报一般由省、自治区级人民政府发布。情况紧急时，可由市、县人民政府发布48小时内的临震警报，并同时向上级部门报告。其它任何单位和个人都无权发布地震预报消息。

科学家不可以预报地震，但可以提供建议和依据。因为地震波及范围不是很大，不需要全国性发布，而省、自治区人民政府有相当的财力和领导力，故由他们发布。

- 防震准备、灾后自救与互救（详见PPT）

地震发生到房屋倒塌约有10s间隔，一楼跑出去，二楼跳窗（因地制宜，不绝对），高楼层就地避震，到坚实的墙角，卫生间等地方。

救人原则：先救近，后救远；先救易，后救难；先救青壮年和医务人员，以增加帮手。

## 第八章 宏观地震学

- 影响地震灾害的因素

①人口密度；②发震时间；③房屋的抗震设计；④震源深度；⑤传播距离。

- 地震分类

天然地震	{	构造地震 90%（92%发生在地壳，其余在地幔上部）
		火山地震 7%
		陷落地震 3%（溶洞或矿井陷落造成）
非天然地震	{	水库地震：库区水压诱发，最大水库地震 1962年新丰江 6.4级
		地下核爆

{	浅源地震（0~60 km）：>85%，波及范围小，破坏力大。
	中源地震（60~300 km）
	深源地震（300~）：波及范围大，破坏力小。历史最深记录 720 km。

- 地震波

横波：周期长，波速慢，振幅大。

纵波：周期短，波速快，振幅小。

面波比体波衰减慢，周期长，振幅大，传播远。建筑物破坏主要由面波造成。

波序：杂波-P波-S波-勒夫面波-瑞利面波。

- 震级M（这里是里氏震级）

$M=\log A$ ，A为标准地震仪距震中100 km记录的最大水平地动位移，单位：微米。

微震（ $M<2$ ），有感地震（ $M\sim 2\sim 4$ ），破坏性地震（ $M>5$ ），强烈地震（ $M>7$ ），特大地震（ $M>8$ ）

● 地震烈度

一次地震对一地区的影响和破坏程度。用 I 表示，中国标准：1~12 度。

影响因素：震级，震中距，震源深度，地质构造，地基条件等。

基本烈度：I<sub>b</sub>，未来 50 年内在一般场地条件下可能遭遇的超越概率为 10% 的地震烈度值。也称偶遇烈度，中震烈度。

设防烈度：I<sub>d</sub>，按国家规定的权限批准作为一个地区抗震设防依据的地震烈度。

多遇烈度：I<sub>s</sub>，建筑所在地区在设计基准期（50 年）内出现的频度最高的烈度。也称为常遇烈度、小震烈度。超越率 63.2%，重现期 50 年。

罕遇烈度：建筑所在地区在设计基准期（50 年）内具有超越概率 2%-3% 的地震烈度。也称为大震烈度，重现期约为 2000 年。

震级 M	震中烈度	面积 (km <sup>2</sup> )	造成人员伤亡的比例	最高死亡人数
5.0~5.4	~6	<500	24%	117
5.5~5.9	~7	<200		
6.0~6.4	~8	几十平方公里	43%	600
6.5~6.9	一半~8，一半~9	9 度<100，8 度<500		

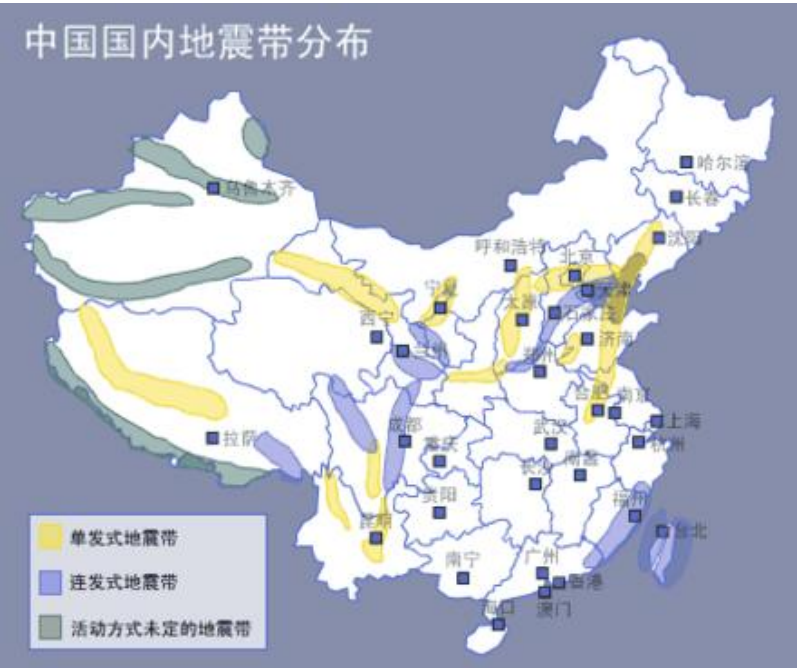
在宏观烈度大体相同条件下，处于大震级远离震中的高耸建筑物的震害比中小级震级近震中距的情况严重的多。

● 地震灾害

直接灾害：地面破坏，建筑物与构筑物破坏，山体等自然物破坏，海啸。

次生灾害：火灾，水灾，瘟疫，毒气释放。

● 我国地震地质的基本特征



我国大于 6 级的强震的空间分布极不均匀，大致以东经 105° 为界。西部地震广泛分布，东部地震相对稀少，震级均未达到 8 级。在上述两地震区域内强震分布也是极不均匀的，东部域分布于华北及东南沿海一带，而西部分布面积大，但塔里木、准噶尔和鄂尔多斯盆地等则地震分布较为零星。

- 减小地震灾害的方法  
地震预报，地震工程。

- 地震危险性分析的方法

地震烈度区划，潜在震源区划分，地震活动性参数的确定，可能的震级上限  $M_u$  测定（依据历史资料和构造类比），地震动衰减规律，地震宏观影响场和地震烈度衰减关系，基岩地震动衰减关系。震级-频度关系（ $\lg N=a-bM$ ）中的  $b$  值，地震活动的年发率  $v$ ，场地地震效应及地震小区划。

场地地震效应：

一、场地破坏 1) [震源浅](#)，断层错动直达地表；2) 建筑物地基低或地震加速度大，造成的[地基失效](#)；3) 斜坡破坏效应；4) [震中距](#)影响。

二、持续时间；

三、场地条件：1) 基岩上地震动幅度小，持续短，灾害轻；2) 软土覆盖层的放大效应（巨厚冲积层上低加速度的远震可以使高层或其它长周期建筑物遭到破坏。引起破坏的主要原因是共振。地震波在土层中传播时，经过不同性质界面的多次反射，叠加增强，某些长周期的地震波与地表土层固有周期相近，由于共振作用，这种地震波的振幅将得到放大，使地表受到更大的振动，此周期称为表层土的卓越周期。也就是它的自震周期。基岩的震动周期约为 0.15s，更新统坚实土层为 0.2-0.5s，全新统较松散软土层 0.3-0.8s，巨厚松散软土层为 0.5-1.1s。）3) [盆地边缘效应](#)

[不同地基的影响 1](#)，[不同地基的影响 2](#)

## 第十章 汶川大地震

- 地震死亡人数

二十世纪，在地震中死亡的人数超过 200 万，全世界有 6 亿人口居住在强震地带。

- [弹性回跳原理](#)

里德[美]Reid, 1906 年观察到圣安德烈斯断层震前 50 年来位移了 3.2 m，震后回跳位移 6.5 m。（估计下次发生同样的地震需要  $6.5/3.2 \times 50$  年，因为每年移动 3.2/50 m，发生一次地震需要位移 6.5 m，所以  $6.5 \div (3.2/50)$ ？）

- 汶川地震发生机理

印度板块向北冲击欧亚板块造成青藏高原隆起的同时，青藏高原向东挤压四川盆地。由于四川盆地扎根地球深部，比较稳定，于是两个板块接触带发生应力集中和变形。汶川地震就发生在这个应力活动复杂的龙门山断裂带上。

烈度分布：震中XI级，成都VII级。

- 为什么说三峡水库不是汶川地震形成的原因？

①水库诱发的地震分布在库区附近或者下游，水平向波及范围很小，一般在 5 至 20 公里之内，而三峡离汶川很远的，至少有数百公里，因此汶川地震不会受三峡影响；②至今我国最大的水库地震是 1962.3.19 的广东新丰江 6.2 级地震，比汶川地震小的多；③海洋中（非消亡边界即海沟处）地震震级最大不到 7 级，水造成的地震规模大不过 7 级。所以说 8.0 级汶川大地震不是由三峡水库引起的。

- 汶川地震与唐山地震的比较

汶川地震震级更大，能量相差三倍，中国东部地区延迟线薄，地震波衰减厉害，四川的延迟线厚，地震波衰减慢，从这个意义上说，汶川地震的影响更大。汶川地震死亡人数更少（~7 万：~24 万），因为发震时间和地点不同，汶川地震发生在白天和山区、农村，而唐山地震发生在晚上和市区。

- 震级的修订原因（7.8→8.0）

1) 地震波传播经过的地方的性质对测量结果有影响，2) 岩石的错动有方向性，不同方向上的地震波振幅不一样，3) 不同的地震学家测定时常常不得采用不同的标度或尺度。4) 综合了全球地震台网内更多的台站资料。

- 汶川地震发生时，北大校园内没什么感觉，为什么 CBD 的人都跑出大楼，不敢回去？

因为面波衰减慢，周期长，振幅大，传播远。在宏观烈度大致相同的情况下，处于大震级远离震中的高耸建筑受到的震害比中小震级近震中的情况严重得多。北京距离汶川地震的震源远，地震波传到北京时，体波已经几乎没有，只剩下低频长周期的面波，高耸建筑受低频震荡影响大，而低矮建筑受调频震荡影响大。所以高楼林立的北京中心商业区（CBD）震感强烈，而建筑低矮的北大校园几乎没有感觉。

- 汶川地震中成都为什么受灾轻？

1) 汶川地震是青藏高原向四川盆地上逆冲造成的，成都位于下盘，位移小。  
2) 四川盆地地质古老，扎根深，是强硬的岩石圈。  
3) 断层破裂最后形成走滑断层，青藏高原向东北移动，位移较大，四川盆地向西南移动，位移较小。

- 玉树地震是汶川地震的继续（不是余震，因为时隔 2 年之久）

地震造成的山体松动需要两到三年时间才能消除。

- 汶川地震中许多矮房只有一层破坏严重，为什么？

距离震源近，低矮建筑受体波影响大；底层受扭力大，易断；一层通常为门面房，墙的支撑力弱。

## 第十一章 海啸

- 海啸与风浪、风暴潮的区别

海啸是海水整体的运动，周期长，波长长（可达数百 km），波速快；风浪只是表面水的运动，波长小，周期短，波速慢。风暴潮（即台风）由海面大气运动引起，是海水表面的运动，海啸是海底升降引起的，是海水整体的运动。

- 海啸形成的条件

1) 地震发生在深海，因为需要巨大的水体；  
2) 大地震诱发，断层垂直错动位移大，只有大地震才能驱动巨大的水体；（ $M > 7$ ）  
3) 开阔逐渐变浅的海岸。大量海水到达海岸而聚集→高浪！海啸等级  $m = \log_2 H$ （ $H$  为浪高）。

- 中国沿海产生海啸的可能性不大

原因：1) 平均海水深度渤海 20 m，黄海 40 m，东海 340 m，南海 1 200 m，故大部分地方产生海啸可能性小，仅东海、南海有可能。2) 亚洲东部的一系列岛弧屏蔽了中国大部分海岸线，而且中国沿海大陆架向外延伸远，海底地形平缓开阔，对海啸有缓冲作用，所以太平洋产生的地震海啸对中国沿海影响也小。如 1960 年，智利海啸对菲律宾、日本造成巨大灾害，但对中国影响小。

## 课堂讨论：地震次生灾害——水灾

- 水灾成因

1. 地震引发的山体滑坡、泥石流等注入湖泊、河谷，阻断水流，拦截成坝，形成堰塞湖，一旦溃“坝”威胁下游村庄城镇；2. 山体滑坡、泥石流注入湖泊、水库等造成的水体外溢；3. 地震破坏水利建筑设施，如水库大坝；4. 地面陷落，可能因注水而成灾；5. 海啸引起的水灾；6. 矿井涌水；7. 喷水冒砂；8. 地震破坏水塔、蓄水池等。

- 堰塞湖分类

高危型：河道泄流通道被堵，而河水仍然不断持续流入，很可能溃决，直接威胁下游。溃决时间一般为几天~100 年。

稳态型：河道未被完全堵死，存在一定的泄流通道，河水流入与流出基本平衡，坝体较稳定，能长时间不溃决，溃决时间 100 年以上。

即生即消型：因坝体松散，没有形成较大蓄水量便在一到几天内溃决。

- 堰塞湖形成条件：

1. 震区有河流经过；2. 河道两侧有山体，河床海拔比山体明显低；3. 地震产生了滑坡，阻塞河道。

- 次生水灾长期对策

1. 合理选择水利工程等建筑的场地
2. 对水利工程按要求设防
3. 进行地震水灾危险性调查
4. 对重点水利工程设施进行普查鉴定
5. 水库、湖泊、河流沿岸的危险山体进行必要工程治理

- 短临对策

1. 密切巡查监视滑坡、泥石流和堤坝的动态
2. 进行必要的搬迁撤离
3. 根据需要，适当泄流放水

- 震后对策

1. 紧急巡查，加强监视，随时排除险情
2. 紧急抢修水利设置，对高危地段作必要的加固
3. 人工疏流排水，必要时可爆炸决堤排水
4. 紧急搬迁躲避。