

趣味地震学 (10) : 烈度, 关乎民生*

冯 锐^{*}

(中国地震台网中心, 北京 100045)

中图分类号: P315 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.0253-4975.2019.10.009

地震烈度(Intensity), 是一个直接关乎民生的参数。

烈度调查, 揭示了地表和建筑破坏的程度; 烈度速报(又称震动图, ShakeMap), 给出了地震动的强弱分布; 烈度区划(国外称“地震危险性图”, Seismic Hazard Map), 为建筑的抗震设防提供了基础依据。在一大堆地震参数里, 没有哪个能像它那样与老百姓的关系如此密切, 有时甚至会牵动千百万人的行动。

道理很明显: 地震烈度反映着地震对地表破坏的最终结果(图 1)。烈度就是破坏的大小、损失的高低, 跟描述炸弹的杀伤力差不多。震级越大、震源越浅、距离越近、地基越差, 烈度就越高。对付地震就是对付烈度, 不是什么其他的参数。

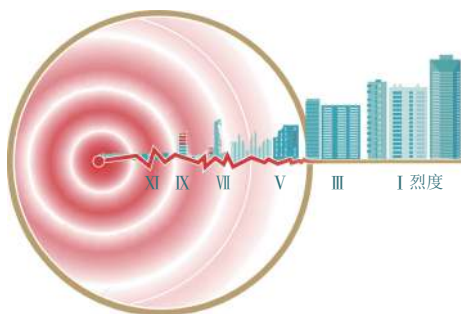


图 1 烈度的原始概念

1 烈度的诞生和发展

1.1 质朴的概念

最早刻画地震的参数, 可能就是烈度了, 那时没有地震仪器, 也没什么高深学问。

盖斯塔尔蒂(J Gastaldi)是个地图绘制者, 1564 年(时值我国明末嘉靖年间)干了件大事: 在标注阿尔卑斯地震的强弱影响时, 在地图上用不同颜色加以分档, 诞生了烈度的原始而朴素的概念。1828 年荷兰的数学教员埃根(P Egen)也用颜色标示过地震晃动的程度, 红色为 I—II 度, 蓝色 III—IV 度, 黄色 V—VI 度。

经后人的不断改进, 意大利考古学家罗西(M S de Rossi)于 1874 年编制了第一个实用烈度表。目的很单纯, 地震会对各地古文化造成不同的破坏, 按照烈度分级, 就能用等震线勾划出破坏强弱的空间分布。地震仪问世后, 意大利的火山学家麦卡利(G Mercalli, 图 2(左))于 1902 年完善了烈度表, 从 10 个等级增加到 12 级, 风靡全球^[1]。

中国的奠基性工作有二: 一是李善邦(图 2(中))1954 年剖析了全球 40 余种烈度表之后, 1957 年发表《中国地震区域划分图》^[2](即第 1 代区划图), 今天已经发展到第 5 代区划图(2015); 二是谢毓寿(图 2(右))制定了首部中国地震烈度表^[3]。

* 收稿日期: 2019-05-04; 采用日期: 2019-09-05。

* 通信作者: 冯锐, e-mail: fr97214@sina.com。



图 2 (自左至右) 麦卡利、李善邦、谢毓寿

1.2 烈度的评定和名称

传统的烈度评定只依据 4 种客观现象：人的感觉、器物反应、房屋破坏、地表变形(图 3)，然后按照烈度表做定性的分级(图 4)。地震烈度要靠专业人员作现场调查，主观性和模糊性是显然的。

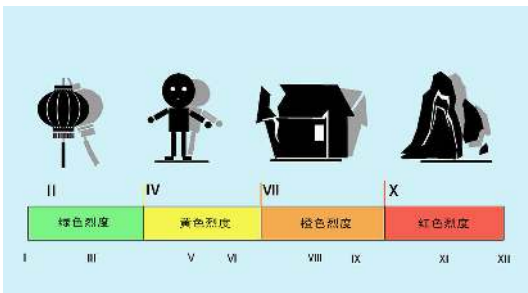


图 3 烈度的评定只根据 4 种客观现象

调查后的烈度分布可以在平面上绘出等震线图。破坏最严重、烈度最高的地方称“宏观震中”，仪器测定的震源在地表投影点称“微观震中”，二者通常不吻合，除断层面的倾斜外，更多的是震源破裂过程所致(图 5)。有些地震会发生多次破裂，比如 2008 年汶川 8.0 级地震、2001 年青海昆仑山口 8.1 级地震，震源破裂延续 300—426 km，极其严重的破坏区也就出现在多部位，会将它们一并称之为“极震区”(宏观震中是其中之一)。

地震的命名，采用微观震中所属的行政

“县”或“地区”名称，不用“村、镇”的小地名来称呼(即便他们是宏观震中)，这个差异有时会引起一些误解。应急救援当然应该奔向极震区，而不是狭义上的行政县或地区。

1.3 应对地震，区划先行

烈度调查会揭示出大量信息，诸如断裂带的展布、地基的薄弱部分、房屋建筑的弱点等。总结经验，就能让今后建筑物的抗震措施有更加明确的目标，由此诞生了烈度区划图。

不过早期的烈度评定是个定性的、平均化的概念，这又限制了烈度区划图的质量。

首先是影响因素众多(图 6)。1800 年前这里发生过大地震，以后只是小震活动。请问：今后盖房子有必要抗拒几千年一遇的最大烈度吗？须知，咱家房子的本身寿命也就 70 年。

此外，即便是同一次地震的相邻地点、相同的基岩，由于覆盖层不同、建筑结构不同，房屋的震动状态也是天壤地别的(图 7)。那么，各类建筑的抗震设防能够用统一的标准吗？

最后是建筑设计，怎么把定性的烈度，转化成加速度、抗剪强度、优势周期和振幅这些量化参数呢？

这些问题的解决，经历了几十年的努力(图 8)，关键的一步是把烈度量化。

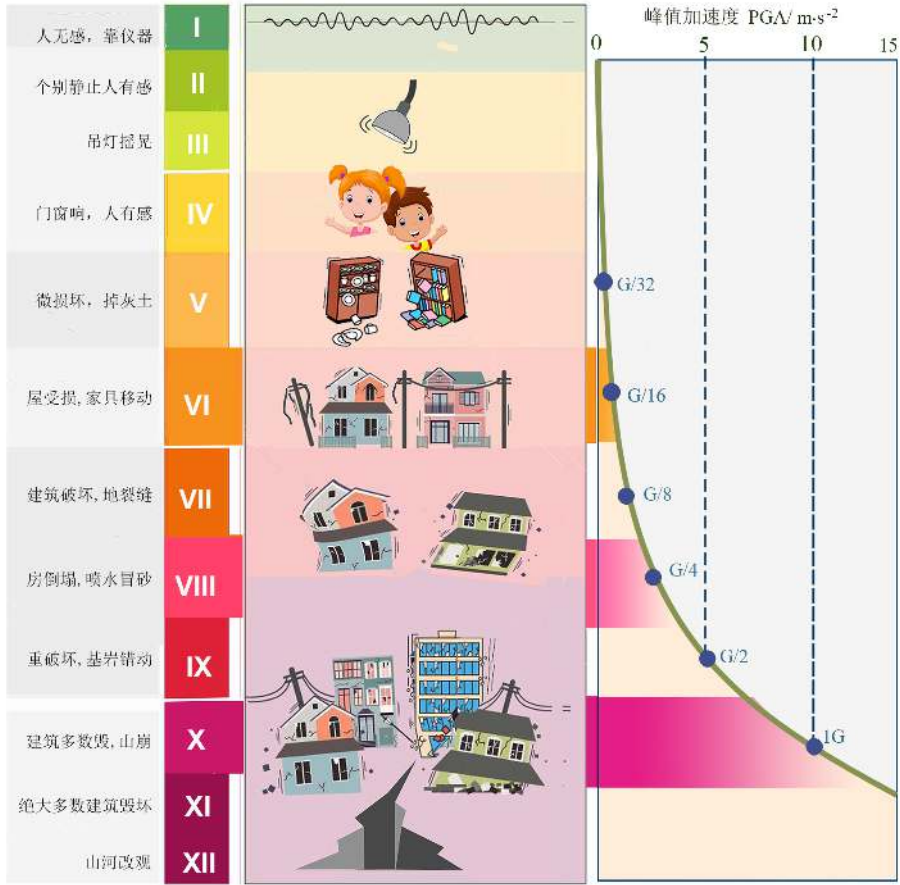


图4 地震烈度表示意图 (图中G是标准重力加速度值)

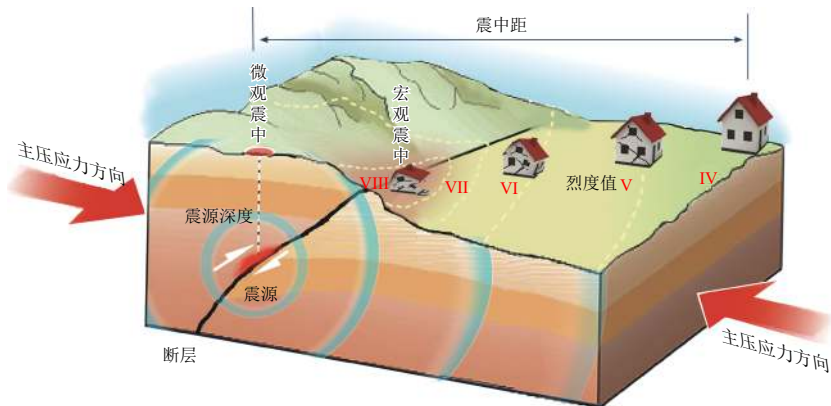


图5 烈度等震线和震中的两种定义

我国现在实施的2015年区划图已经与国际接轨: 区划的基本原则是以建筑抗倒塌为目标。用地震动加速度替代了定性的“基本烈度”, 成为强制性执行的国家标准。

2 地震烈度的定量化

2.1 烈度量化的三参数

按照牛顿定律, 当地震水平加速度为 a 时, 建筑物必然受到惯性力 Ma 的反方向作



图 6 影响地震烈度的因素很多

用，它是最为本质的破坏力(图 9)。因此，加速度 a 当为烈度量化的第一参数。

其次，地震动不是钢琴键盘上的单频振动，复杂变化的振幅和频率有着不同的选择性破坏(图 10)。比如小震、硬地基的高频成分多，易破坏刚性结构；大震、松软地层的低频成分丰富，容易损坏高柔结构(图 11)。所以，地震动反应频谱就成为烈度量化的第二个基本参数。

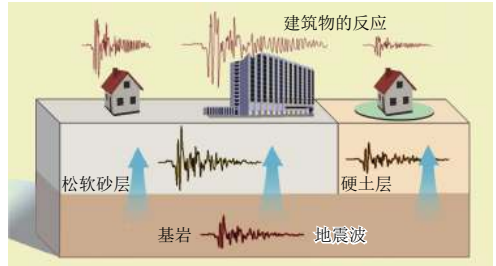


图 7 不同地层和建筑对同一地震波的不同反应

最后，鉴于地震活动存在不确定性，而地震地质的确定性方法又难以反映这个特点，目前世界各国的区划编制主要采用统计分析方法给出 10—50 年的预测意见，那就必须引入第 3 个参数——概率。

2.2 峰值加速度 PGA 和特征周期 T_g

先看一个实例。

日本大船渡台和神户台的建筑性能相近，遇到了烈度相近的地震(图 12)。前者的地震动峰值加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)1 105 Gal(伽，重力加速度的单位)，建筑未受损。后者的 PGA 为 818 Gal，损失巨大。



图 8 中国地震区划图的发展

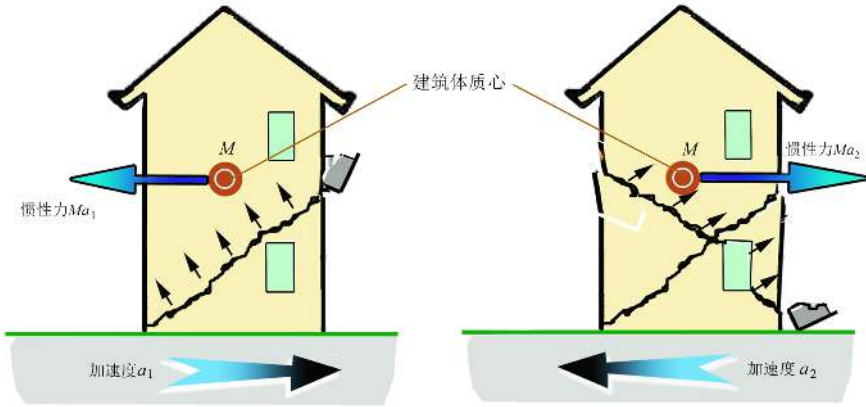


图9 建筑物质量 M 和地震动加速度 a 的关系

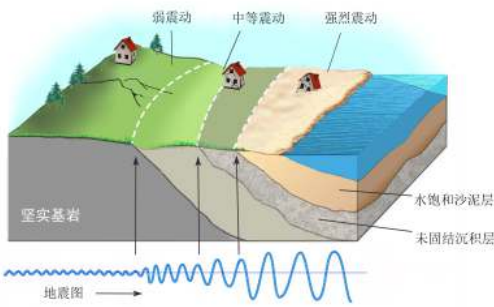


图10 不同地质结构的不同地震波谱

仪器记录给出了答案：地震动的破坏程度不仅与加速度的幅值PGA有关，还取决于振动周期和持续时间。前者的PGA虽然高，但频率高、持续时间短；后者振动的优势周期明显大于前者，是共振发挥了作用(图13)。

进一步讲：所有的建筑，不论国贸大厦还是菜地瓜棚，都有一定的自振周期。单层砖混建筑的自振周期在0.2 s以下，中高层建筑多在0.3—0.5 s，20层以上以及复杂的建筑物会达到1—2 s甚至更长。通过频谱分析，就可以把地震动状况和建筑体的性能剥离开来，说明烈度是个二维问题——同时取决于加速度 a 的幅值和周期 T 的范围。

地震动反应谱经过平滑后，都呈一种非对称状的梯形(图13)。平台值便是峰值加速度PGA，平台值右侧开始下降的拐点G最具代表性，相应的周期称“特征周期” T_g (右下角标g表示地面ground之意)。 T_g 可由下式确定：

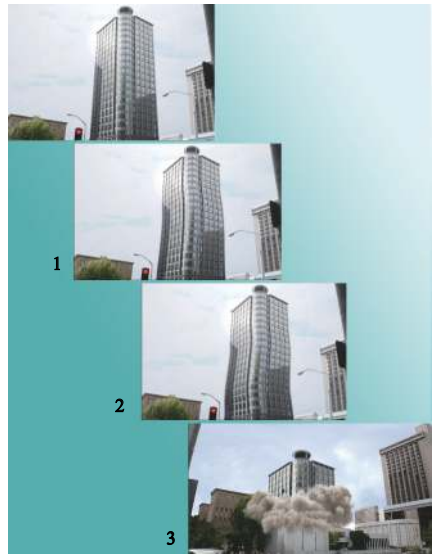


图11 低频震动是破坏高柔结构的主要因素

$$T_g = 2\pi \frac{PGV}{PGA}$$

PGV是仪器实测的峰值速度(Peak Ground Velocity)^[4]。

T_g 对应着潜源的震级上限，震级上限越大、它越大， T_g 还反映了地震环境对反应谱的控制作用。深厚的软土地场，会使地震动长周期分量变得相对丰富，加速度反应谱的长周期谱值会明显增大。比如1989年9月19日墨西哥8.1级地震，距震中约400 km的墨西哥市是个古湖床场地，它的地震动卓越周期居然能高达2.0—4.0 s，势必成为破坏高层建筑的元凶。

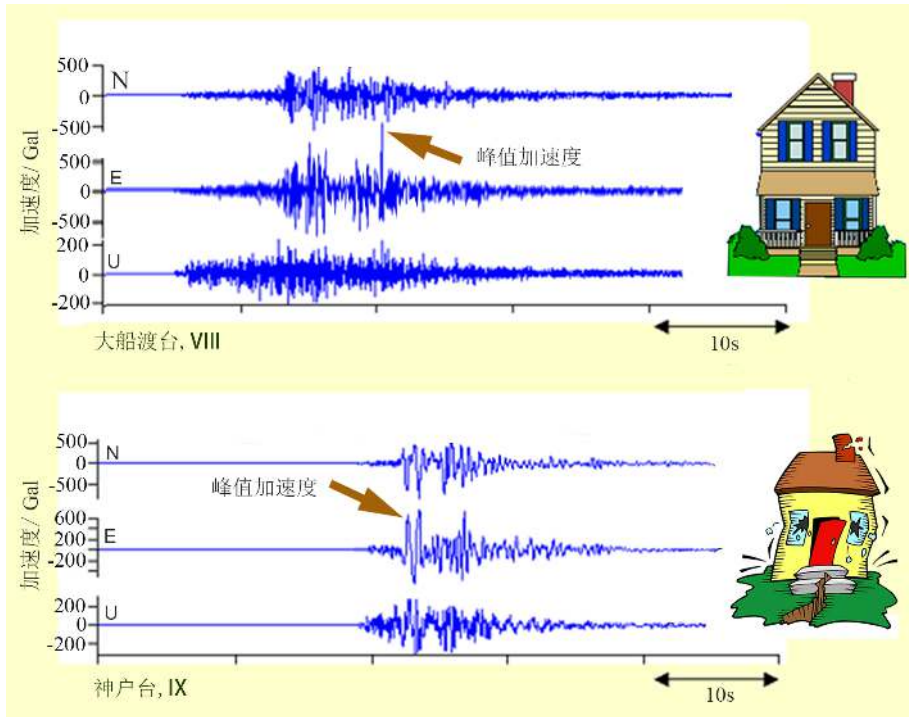


图 12 相近的烈度但是破坏程度不同 (<https://www.jma.go.jp/jp/quake/>)

区划图给出 PGA 和 T_g 的空间分布图, 无异于提供了反应谱的关键信息, 对地震工程既科学又实用^[5]。

2.3 概率预测的含义

区划图是用概率来隐含地表达对地震的预测意见。

100 年内长江会出现多大的洪峰? 200 年内核电站会遭遇到的最大烈度是多少? 水利和地震部门就要根据现有资料做统计分析, 让长江大坝的建设高度、核电站的防范措施均按照概率高低做合理的安排。过度产生浪费, 不足导致危险。具体的抉择再依据建筑物的重要性、失败后产生的次生灾害、使用功能可否中断来分级确定, 避免了过去“单一水准设防”的缺点。

地震概率的计算有几个假定: 潜在震源区里各类地震的年发生率保持稳定, 发生时间上独立随机、空间上概率均等, 一般用泊松分布来描述; 地震动参数服从随距离衰减的统计规律等。当采用了断层模型、地震活

动性模型或地震矩速率模型后, 就可以推算出概率的时间和空间分布。

3 地震区划图

我国地震区划图用参数 PGA 和 T_g 表达 (图 14)。“基本烈度”系指未来 50 年内、一般场地条件下、超越该图参数值的概率为 10% 的地震烈度 (通俗地说: 9 成不会超过这些值), 其重现期相当于 475 年。它适用于一般建设工程的要求, 其风险水准是目前国际通用的。D Giardini 主编的 2013 年欧洲 PGA 的区划图 (图 15), 也是同样的水准。

为了推广应用, 欧美国家把专业区划图进行了扩展普及。

图 16 是加拿大 2015 年颁布的两种区划图, 左侧是专业系列图, 右侧则是普及版——适用于最普遍的 1—2 层民宅、同等烈度 (约在 VIII 度) 下、周期为 0.2 s 的震动, 该图用颜色标示出危险程度的相对高低, 没有数字和单位, 便于公众理解。

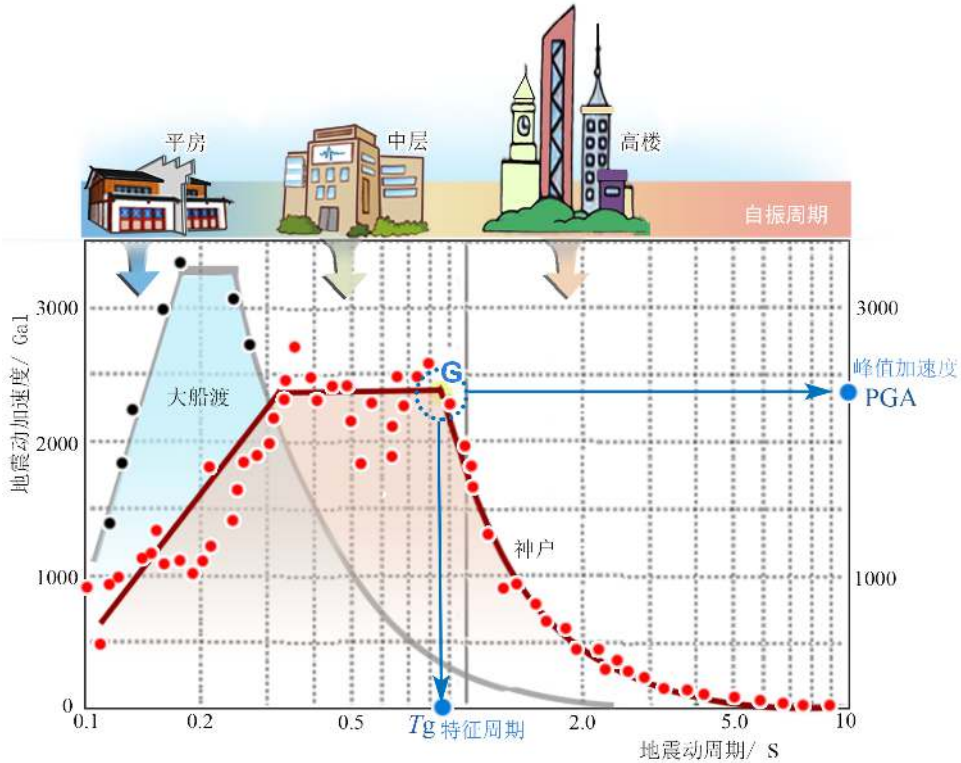


图 13 地震的加速度反应频谱的对比 (根据 JMA 数据)

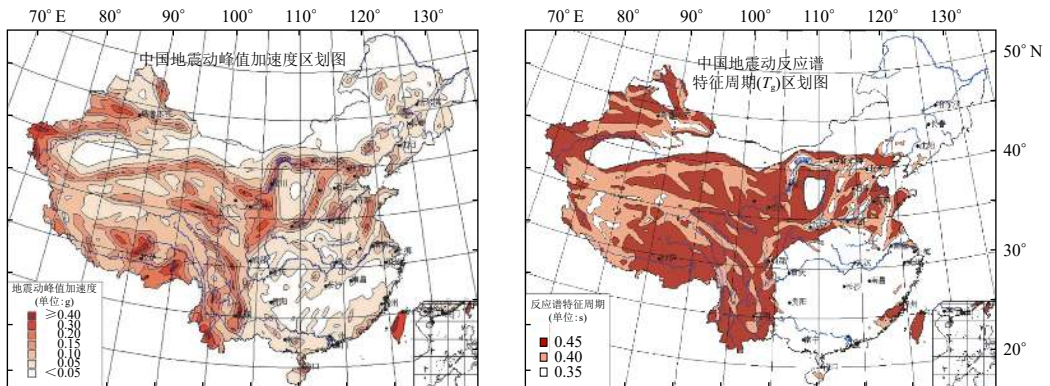


图 14 中国地震区划图

图 17 是美国的两种图。左侧是(简化)专业图(50年超越概率 10%)。右侧是对诱发地震的破坏性震动(Damaging Earthquake Shaking)的概率预测^[6], 2016、2017、2018 年试验了 3 年, 针对中部和东部地区, 发生概率在 1% 以上。这种逐年总结、不断尝试的做法, 颇有意义。

4 没讲完的故事

4.1 建筑物的抗震设防

《地震区划图》绝对不是学院里的高雅清谈, 它具有法律效力。为了执行之, 国家又制定了相应的《建筑抗震设计规范》。这就给房屋的设计和建设套上了双重“紧箍咒”。

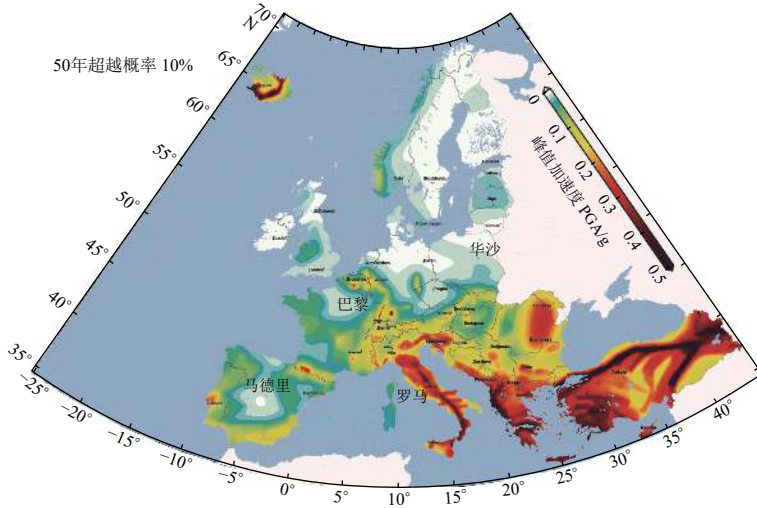


图 15 欧洲 2013 年地震危险性图 (图源 <http://www.share-eu.org>)

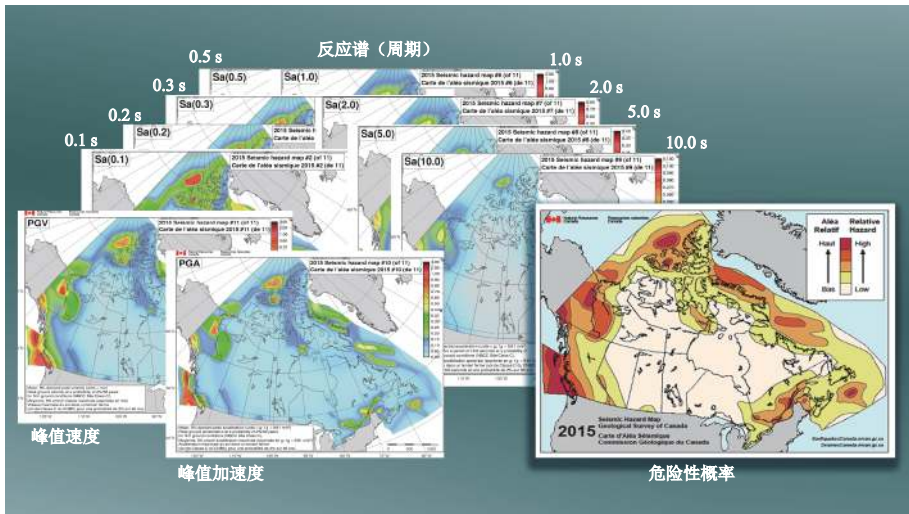


图 16 加拿大的两种地震区划图 (图源 <https://en.so.com/s?q=simplified+seismic+hazard+map+for+canada>)

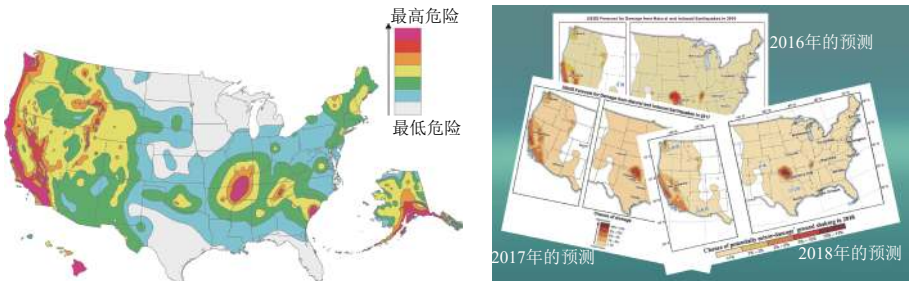


图 17 美国的两种地震区划图^[6]

区划图给出的是“基本设防”——只应对大概率的地震烈度(而非最大烈度),各地

的峰值加速度 a_0 均不同。那么在基本烈度的左右两侧总会存在相对的、低于和高于 a_0 的

情况。即，每个建筑物都会面临3种可能的烈度状态：多遇的(偏低)烈度，基本烈度，罕遇

的(偏高)烈度(图18)，其峰值加速度PGA大致分别为： $a_0/3$ ， a_0 ， $2a_0$ 。

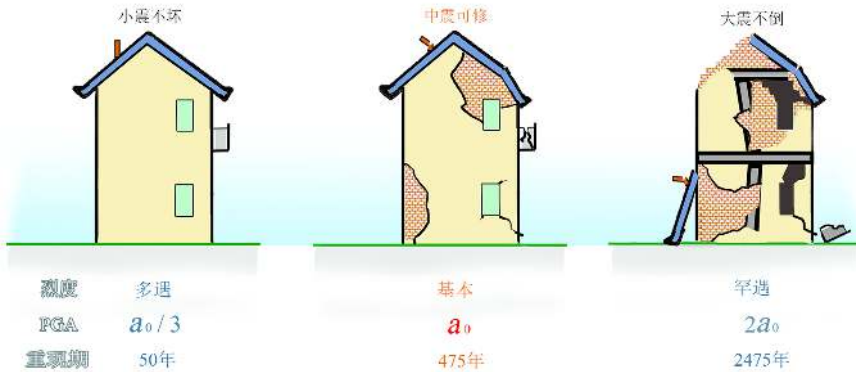


图18 抗震设防的三水准目标

就人们常见的居住、工业、商业、办公、隧道、桥梁等一般性建筑而言，设防就不能“单一水准”了。以基本设防为中心，兼顾两侧，才能实现“小震不坏，中震可修，大震不倒”的三水准设防，建筑物要分别适应弹性变形—非弹性变形—弹塑性变形。“中震可修”是就基本设防而言的，对于核电站、大型水库、特殊工程的烈度参数，还需做专项地震安全性评价。

汶川地震的事实证明，即使在X—XI度

极震区里出现了80%以上房屋建筑倒塌，除却山体滑坡、地基沉降的地面破坏原因外，大部分遵照国家设防标准实施的正规建筑物（包括电站、国防工厂、民居、宾馆、办公楼等），对高于它1—2度的地震袭击仍然经住了考验，虽有破坏但未倒塌。我国的地震烈度区划发挥了积极作用，科学而合理。

图19(左)为北川一座正规建筑的高楼，是按照区划的基本设防(Ⅶ度)和抗震设计规范建设的，在XI度的破坏下没有倒塌。



图19 正规建筑经住了汶川大地震的破坏(左图北川,右图成都)

成都市都江堰虹口乡高原村三组作为农村示范村, 统一执行了《中国地震动参数区划图》和《建筑抗震设计规范》, 按照Ⅶ度设防建设, 38套农村民居房于2007年完工。次年, 遭遇汶川大地震, 震中距10余km, 该处地震烈度为Ⅺ度, 这些民居全部完好无缺(图19(右)), 亦无一人伤亡。

4.2 地震保险

老百姓还有疑虑:

“中震可修、大震不倒”, 谁给我修啊?

财产坏了, 谁给我赔呀?

家人没了, 总不能白死吧……

您别怕, 还有一招。

当前, 新西兰、美国、日本、智利、秘鲁、土耳其已经实施**地震保险**。新西兰的经验最多。

新西兰的地震远比我们多, 每年15000次, 有感地震1500次左右(图20(左))。他们的地震区划和地震保险已形成法律体系, 通过政府和市场行为相结合来分散巨灾风险。买房子的时候会强制性的征收地震巨灾保险费, 每户每年约60新元(约合人民币270元), 由保险公司收取后交给地震委员会、再上交一部分给政府, 住宅的最高责任限额为10万新元(约合人民币45万元)。

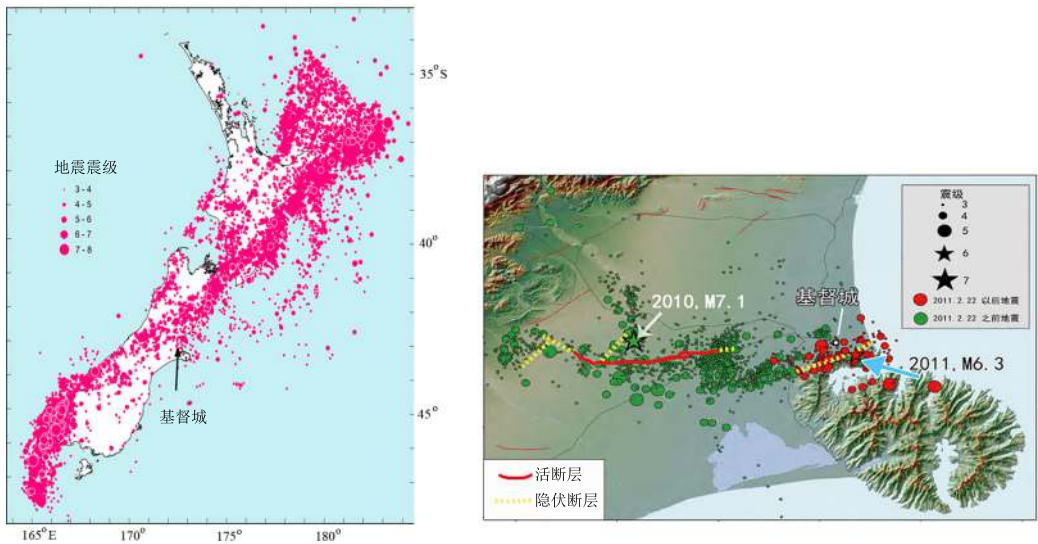


图 20 新西兰地震分布

基督城(Christchurch City)在2010年9月4日和2011年2月22日先后发生7.1级和6.3级地震(图20(右)), 先后提出了18万件和15万件索赔, 动用的保险金15亿和10亿新元, 不足部分由政府托底。对它的处理已成世界最大的“地震保险事件”, 各项法律规定亦在不断完善中:

(1)财产索赔、商业损失索赔和再保险赔付, 能正常运作, 政府对每个遇难者也都给予了保险赔偿。新问题也在出现, 比如这两次地震相隔5个月, 又发生在同一个地区, 究

竟算是一次主震-余震序列的活动, 还是两次独立的主震序列呢?

学者们口无遮拦, 而保险公司却万分头痛: **这涉及到掏一次银子还是给两次赔付的大问题!** 据悉, 在过去的30年中, 整个国家的地震保险赔付率并不高, 总额未超过5%。

(2)建筑倒塌的追责。2011年地震中, 坎特伯雷CTV大楼Canterbury CTV Building的坍塌(115人丧生)最为典型(图21), 法律追责过程十分漫长。直到2017年才得出结论: **大楼设计师不具备资质, 建筑设计未满足**



图 21 坎特伯雷 CTV 大楼在地震前后

1986 年建筑抗震规范，市政议会在颁发建筑许可上失察。

但按现有的法规，警方又不能起诉责任人(设计师仅受到处分)，舆论哗然。以此为训，2018 年议会才决定：废除《刑法》中这一条不利于被害人的法规。

2015 年，我国的地震保险业务在云南大

理州开始试验。2019 年，中国再保险集团公司高调现身，持续推进着政府、市场、社会与个人的自然灾害风险共担机制。

公众很单纯，只希望地震烈度的故事越讲越好。

作者对俞言祥研究员的严谨指导、认真修改，深表感谢。

参考文献

- [1] 豪厄尔. 地震学史[M]. 柳百琪, 译. 北京: 地震出版社, 1998
- [2] 李善邦. 中国地震区域划分图及其说明[J]. 地球物理学报, 1957, 6(2): 127-158
- [3] 谢毓寿. 新的中国地震烈度表[J]. 地球物理学报, 1957, 6(1): 35-47
- [4] 雷建成, 高孟潭, 吕红山, 等. 四川及邻区抗倒塌地震区划图编制[J]. 地震学报, 2011, 33(2): 219-233
- [5] 北京市地震局. 话说第五代地震区划图[M]. 北京: 地震出版社, 2016
- [6] Petersen M D, Mueller C S, Moschetti M P, et al. 2018 one-year seismic hazard forecast for the Central and Eastern United States from induced and natural earthquakes[J]. Seis. Res. Lett., 2018, 89(3): 1049-1061

(null)