

366961

地震预报和地震学

DZYBIDZX



科学技术文献出版社

地震预报和地震学

编辑者: 国外地震编辑部

出版者: 科学技术文献出版社

印刷者: 北京印刷二厂

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

开本 787×1092·1/16 4.25印张 107千字

统一书号: 12176·24 科技新书目: 145-19

定价: 0.40元 印数: 1—12500册

1979年12月出版

目 录

地震预报问题	(1)
地震预报	(13)
地震预报的实际战略和东海地震预报	(20)
评述美国与地震预报有关的岩石力学研究	(29)
地震灾害	(36)
地震学与地球内部	(50)

地震预报问题

摘要： 通过地震区域划分、详细的地震区域划分和预报地震的地点、时间和强度，确保减少地震带来的损失。所有这些研究方向，都是建立在综合地质、地震、大地测量及地球物理方法的基础上的。在加尔姆试验场工作的例子表明，在1976和1977年地震前单个地球物理分量及这些量组合的变化特性。

目前，在那些遭受破坏性地震影响的国家里，地震预报问题已成为科研工作的一个方向，围绕它在地质和地球物理领域进行着最广泛而又方向明确的研究。地震预报工作要求对地震的本质及其表现广泛开展综合研究，以求确定发震的时间、地点和预计的强度。与这个预报方向联系最密切的是预报地震对地面的作用。小尺度和详细的地震区域划分，在某种程度上也是预报问题的一部分。两者的本质区别在于：预报时间、地点和强度属“动态”预报，而区域划分属“静态”预报。将来，可能把用工程方法预防地震作为预报的总方向。

按此途径解决地震预报问题，便要把研究地震的各方面工作都结合在一起，其中包括研究地球的构造，即地震发生处的介质这一部份。

预报决不只是结合地震学，而是要结合地球物理的各个方面开展一系列的研究，这是由于预报地震的时间、地点和强度的本身，在很大程度上依赖于对地壳形变及与此有关的电磁

和地化学过程的广泛研究。

在谈地震预报时，不能不考虑，在包括断裂物理（它是理解地震震源物理过程普遍规律的基础）在内的现代物理和固体力学成就的基础上，对模拟地震过程进行广泛的理论和实验研究。

最后，必须指出，还要进行地质方面的各种研究，这不仅对了解作为地震现象基础的构造过程是重要的，而且对减少地震（由于伴有地质过程）所带来的损失方面也是重要的。地震时伴随的地质过程有：在多山地区的山坡崩塌、土壤的“液化”、泥石流及其它地表形变的快速过程。预报研究的总图示于表1。

进行地震区域划分是预报的第一步，它在地球物理研究所（ИФЗ）已有悠久的历史。实际上，研究所的所有活动，从建所之日起，就与建立和完善地震区划方法有关。在地球物理研究所成立后的50年里，根据新的观测资料及对这些资料进行综合方法的发展，每隔10—15年制定一次新的较完善的区域划分图。

表1 为减少地震灾害进行预报研究的总图

研 究 的 问 题	研 究 的 目 的	实 际 应 用
地震的物理本质是什么？ 什么地方将发生地震？ 什么时候发生地震？ 地震的物理本质是什么？ 地震时土地的振动特性将如何？ 伴随地震的一些过程（崩塌、地滑、断裂等等）将如何？	地震区域划分和地震危险性 估计地震的灾害 地震的工程地震学特性 地震预报 预防地震	根据地震和地质危险进行建筑规划 建立抗震结构 准备救灾措施及计划 计划疏散居民和组织通报系统 经济和社会问题

在解决地震区域划分方面,虽然至今我们仍遇到很多困难,但是地球物理研究所(ИФЗ)与国内其它地震机构共同协作而制定的区域划分图,已为克服这些困难前进了一大步。在这个图里最主要的是什么呢?

首先,在图上除了一般表示地震烈度区外,还给出发生强地震的地区并按发生地震的震级大小对这些地区进行分类。图的第二个特点是按强震发生概率或重复周期划分烈度区。最后,第三个特点是随图可靠地给出地震在地面表现的一般定量特征(加速度、速度、振动的持续时间)。图的这些特点,使我们能够在地震危险区,根据发生地震事件的概率制定抗震建筑规范的新办法。

这项工作所以能够完成,正是由于我国在发展地震观测系统方面取得了重大进展。地球物理研究所(ИФЗ)在自己的历史进程中建立了地震机构的核心,并在苏联的各加盟共和国及远东地区建立台站,因而促进了国内地震观测总系统的发展。现在,统一的地震观测系统(ЕССН)联合着属于不同机构的200多个台站,其中56个是基本台。这种联合的原则是:协调各地震机构的工作,出国家地震台网报告,出每年一次的“苏联地震”文集,组织台站管理人员的培训及其它措施。这项巨大的科研组织工作还包括台网优化问题的科学审理,完善台站上的观测系统,在实践中采用新的分析方法,提高确定地震震中及震源参数的精确度,以及发展地震仪器。

在谈到地震区域划分的成就时,不能忘记在这个问题上地质学家所做的贡献。很多地质队的工作确定,苏联国土上的大地震,在多数情况下与地壳的深部断裂有关。沿这些断裂,具有不同迁移率的地块进行连接。断裂的延续,被断裂分开的地壳各块垂直运动的对比,不同方向断裂的交错,断裂的存在时间,都代表着构造上及地质历史上的特点,它们首先引起了地震学的关注。研究最新运动,其中包括全新世时期运动的地貌方法,现在具有特殊意义。正是这些资料与地震资料的组合是地震区域划

分的基础。

这样,综合地震台网的观测资料和一般的地质规律是小尺度(比例尺1:2500000)区域划分的基础。由于在我国地震危险区内人口的增加,工业及文化建设的发展,这项工作的意义逐年增加。因而,在许多情况下,当地的地震危险程度决定了工业区的未来发展前途。

从保障人民生命安全和减少物质损失方面来看,由于在地震区域划分里估计了强震可能发生的地点和它们的平均重复周期,我们实际解决了地震预报问题的一部分。

详细地震区域划分(ДСР)是在作了小尺度区域划分后对地震危险性进行估计的又一个步骤。详细地震区域划分(比例尺1:250000)的资料,对实际用于作大型建设项目规划和对地震预报都是重要的。

详细地震区域划分的任务主要包括:详细估计指定地区在第四纪及其各时期的构造活动,查明深部断裂的构造活动区及它们的交错区,改变了符号与强度的构造运动区,以及确定运动的速度梯度。为此目的,利用了宇宙的和航空摄影测量的方法,并与地面的雷达研究相结合(同时还有传统的地质和地球物理方法)。这一切广泛开辟了解决这个问题的可能性,有利于查明影响地震活动的地壳内部破裂和上地幔的构造特征。在这些研究中,大地测量在估计现代运动的速度方面起着重要的作用。

查明可能属于上第四纪和全新世时期地震活动表现的剩余形变,在这些工作中具有特别重要的意义。这些资料能大大开拓我们对过去强地震的认识,从而提高我们对未来估计的可靠性。很重要的一点是强地震聚集的地区往往与剩余形变的最大密度一致,这就使我们能较有把握地判断不同地区地震危险的程度。

在详细地震区划里,仪器的观测有利于查明地震震中分布的细节、震源深度、地震重复性、振动的频谱成分、地震能量衰减、地震机制、地震与已测定的构造区的关系。这些观测给出原始资料,利用这些资料通过由弱震向强震过渡的办法绘出强地震振动的动态特性(振

幅、频率、持续时间)。

详细地震区划的成果用地震危险性图表示之,其内容包括:地震振动的定量特性(速度、加速度、持续时间、振动周期)、地震重复的概率和估计强地震预期的震源机制。同时根据地质资料估计下述现象的危险性,如地滑、崩塌、土壤液化、沉陷等,它们都可能在强地震的作用下发生。

我们较详细地论述了详细地震区划,因为详细地震区划的测量方法回答的不仅是地震危险区域划分问题,而且能够阐明在布置预报观测时所需的一些基本指标。

由于近数十年来在电子学中发生的根本变化,使我们能制造出具有宽动态和频率范围的轻便拾震器,因而地球物理观测方法的进展才成为了可能。由于采用新的电子设备,使仪器实际具有无限制的放大倍数、高度的稳定性、精确度和经济性,另外设备标准化、观测自动化和采用电子计算机处理观测资料,使我们现在可以认为,要实现要求能高度有效处理资料的直接地震预报任务已是现实的。还要指出,现代化的通讯工具提供了在总中心有效收集资料,处理数据,和在这些中心使用大型计算设备的条件。

解决同时确定地震的时间、地点和强度这一任务是地震预报问题本身的基础。

历史上预报地震的第一个计划是Б.Б.戈里津(Голицын)〔1〕在1911年提出的。他指出需要做以下的工作:1)仔细研究震情和地震振动记录的特点;2)为了估计应力状态,要研究在地震活动区地震波的传播速度;3)进行大地测量,以查明地壳的缓慢形变;4)布置重力测量;5)研究泉和井的状况,研究在地壳内被吸附的气体成分。

所有这些想法,在当代研究地震前兆的计划里都得到反应。

在1948年阿什哈巴德(Ашхабад)地震之后,于1949年在塔吉克共和国的加尔姆(Гарм)地区开始进行预报工作。下一年在土库曼的北天山也开始了这方面的工作。这些初步

考察基于传统的、定期短时间观测。它相当令人信服地说明,要得到稳定和有意义的结果,必须进行连续的观测。这些工作的计划由科学院院士Г.А.甘布尔采夫(Гамбургцев)在1953年末提出〔2〕。第二年,研究所就投入相当大的力量,为在加尔姆和杜尚宾(Душанбин)地区连续积累资料而建立观测系统。选择这个地区是由于它有高度的地震活动性(在苏联的大陆部分,这是地震活动性最高的地区)。

这些工作的第一阶段在1955年开始。这阶段的工作,主要包括制定研究弱震活动性的方法——以比过去高得多的精度确定震源,进行地震能量的广泛分类,研究地震震情——地震过程随时间的表现规律,研究不同能级地震的振动频谱成分,利用地震研究地壳构造,研究由弱震向强震过渡的特点等项工作。应该指出,所有这些工作在地震学里都是新的,也就是说在加尔姆地区工作的基础上建立了详细研究地震活动性的方法,它也广泛适用于其它地震活动区。所进行的观测也是试验和改进新仪器及其标定方法的依据。除了地震观测外还开始了大地测量和倾斜仪观测方面的工作。另外还进行了大量的工作,来探讨地质和地震过程之间的关系。

上述第一阶段的工作在1960年前结束。它使我们得到许多地震过程的规律,并同时发现这些规律随时间的变化性。下一步的工作自然是研究地震量随时间的变化并扩大对其它地球物理参数的观测。60年代初,在地球物理研究所(ИФЗ)的计划里,预报题目的安排有利于预报研究的更有效发展。必须指出,在1966年塔什干地震和С.А.费多托夫(Федотов)在远东进行长期预报工作〔3, 4〕之后,对上述工作的兴趣更加增大。

就当代的知识水平而言,对地壳的物理性质和在那里发生的各种过程的性质及强度的了解,还很不清楚。这自然使预报问题的解决遇到很大困难。在地震的震源区内不能在介质内部进行观测更使困难增大。较好的情况是观测可以在探井和矿井里进行,而多数情况是直接

在各种干扰水平很高的地面进行。

这个问题的困难还有另一个社会因素，这便是地震预报应有高度的可靠性。不这样，它只会引起居民的恐慌和给经济带来重大损失。

还可指出，地震预报如和气象预报相比，有其优越的一面，即在地壳内发展并导致地震的过程是相当缓慢并可能是较稳定的，没有像大气层中的过程那样快速变化。

许多国家，如苏联、意大利、日本、新西兰〔5〕在进行各种地震和地球物理观测过程中，已积累了有关地震前兆的资料。然而所有这些资料的取得基本上还是带偶然性的。看来只有进行大地测量的目的性相当明确。

在六十年代初期，在加尔姆地区开始了各种地震前兆的系统研究。地震与地球物理场长期的基本性质及其在时、空上的分布，这些量对其平均值的偏离都被当作研究前兆方法的基础。

同时开始广泛发展各种实验工作，来研究

岩石样品在高压下性质的变化，研究在样品破裂前的力学和电磁过程，并探讨破裂过程本身。到目前为止，我们还不能认为实验室研究就是自然过程的物理模拟，因而实验室的观测只能按其“相似性”与观测到的自然变化比较。但实验与自然观测的相互补充，使我们不管在自然条件还是在实验条件都能更明确地进行研究，大大改善对地震孕育过程的理解，并且如我们希望那样，开辟通向真实模拟的道路。

最近几年，在当代固体力学和断裂物理的基础上，推进了对单个震源的理论研究。这样，虽然预报在很大程度上仍依靠纯经验的资料，但许多现象已找到了理论的解释。

在理论计划里不仅要建立震源模型，而且要对许多震源的组合——地震过程进行纯数学模拟，还要对观测到的，对预报本身统计上有意义的前兆及其总和实现一般的公式化。在图1给出研究强震发生判据的所有观测项目总图。我们定义的强震，其强度是按震级 $\geq M$ 来决定

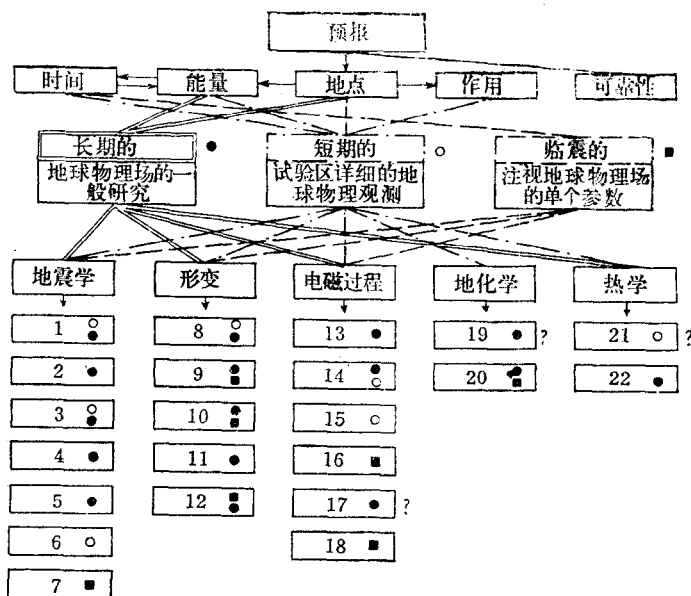


图1 预报观测总图

问题的符号标明要求检验的方法。1——空间情况 (x, y, H, t, E)；2—— V_p/V_s , A_s/A_p ；3——震源机制；4——震源的应力降；5——频谱分析；6——地声；7——声学；8——大地测量、水准测量、三角测量；9——地面倾斜；10——形变；11——井和泉水的流量；12——层状挤压；13——地电流；14——用交流和直流电探测；15——磁偏；16——差动磁测量；17——震源水的导电性；18——大气电；19——岩石中吸附的气体，氢、氮、二氧化碳、水银；20——泉和井的化学成分，氢、二氧化碳及其它；21——探井里的热流；22——泉的温度变化规律

的〔5〕（记住，塔吉克地震的 $M = 5.3$ ）。在图里没有给出地震前动物的表现，对此现在许多研究预报的国家都特别关注。

在图2给出根据到目前为止积累的资料查明的地震前兆信号的形状，以及孕震时间（出现前兆的时间）和地震震级间的平均关系。粗

略给出与震级相对应的震源尺度和可能出现前兆的地区范围。

在预报总图里人为地分出三个基本预报阶段：长期的、短期的和临震的。预报按时间划分很重要，这样我们可以安排和进行不同意义的保护措施。这些措施的一种可能方案示于表2。

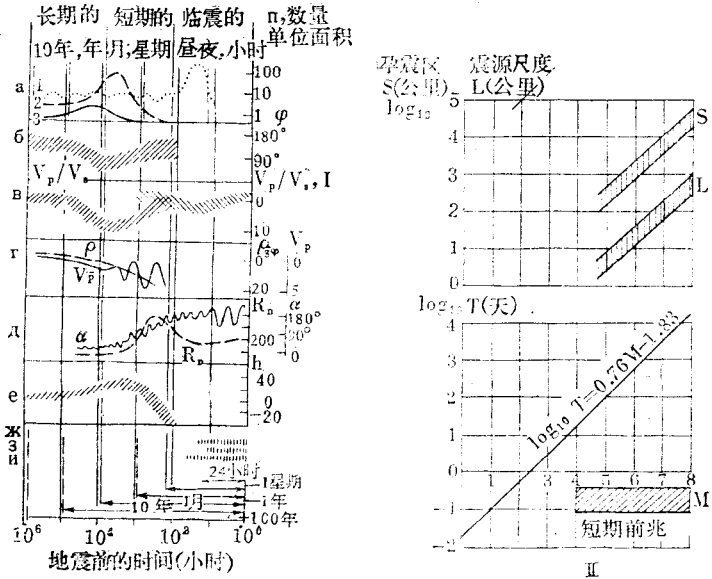


图2 预报信号随时间变化的特性 (I) 和震源尺度 L 、孕育区 S 、观测到前兆的时间对震级的依赖关系 (II)

a——震情：1——极弱地震 $M \leq 1$ ；2——弱地震 $M = 1.5-2$ ；3——中等地震 $M = 3-4$ ；6——应力轴方位角的变化；b—I——纵波与横波的速度比和地电流的变化；c——由人工办法得到的电阻和纵波速度的变化；d——地面的倾斜和泉水中氧的含量；e——水准测量；ж——生物的正常表现；з——大气层的发光；и——超声波。图II中下图的阴影部分表示有快速出现的前兆的震级范围

表2 由于预报地震而需采取的措施

预报时间	社会措施，建筑物的估计	贵重物品	保障生命	特殊措施
临震的，小时，1—2天	由危险建筑物里疏散居民。停止人口群集处的工作(电影院、剧院、学校)	疏散个别最重要的贵重物品	准备医疗机构，交通工具；在地震发生时通知居民发震地点	关闭电网、煤气管道、危险的化学企业、原子能电站等等
短期的，1—6个月	估计可能的损失。疏散居民的计划	采取措施保存大多数贵重物品	准备救灾措施和医疗机构。疏散重病号。减少进入危险区的人数。保证防火安全	转移或防护有毒物品，降低水库的水位等等
长期的，1年—10年	建筑物登记，拆除最危险的，加固不可靠的。编制对强地震时可能发生情况估计的报告。查明最不可靠的建筑物		计划救灾粮食储存。计划医疗机构的使用	转移危险品的保存地点

应该注意到,当前地震预报还处于发展的最初阶段,许多前兆信号的规律和性质还远不是任何时候都能严格确定的。只有在对应不同地质条件的各地震活动区,观测预报信号形状的变化,才是地震预报工作的基本部分,并决定着预报的可靠性。这项任务是很复杂的,因为强震很少发生,预报信息的积累很缓慢。

前兆普遍的小概率性使我们不得不广泛应用各种方法对其进行观测。遗憾的是,实际上到目前为止,世界上还没有一个地方确保了所有观测方法的必需组合,其原因是处理资料的工作量大且复杂。研究前兆的经验指出,今后大概可以大大缩减观测方法,只保留某些主要的方法。

目前,加尔姆—杜尚宾试验场,由于最大限度地使用了各种观测方法而成为最有价值的地区之一。在图3给出试验场加尔姆部分地区图 and 在那里开展的工作种类。我们略谈谈加尔姆试验场上完成的某些工作成果(图3)。

在这些工作中地震观测占相当大的比重。确定震中的高度准确性,使我们能进行震情的详细研究。这项工作的一个重要结果是发现强震前的“平静”。下面图10, a 给出在1973—1977年间能级 K 为10—11的地震个数的变化。在1973—1974年期间(在地区中部)这类地震的分布相当均匀。1975年,在几乎完全没有地震的情况下发生了 $M=5.2$ 的地震。同样,1976年9月 $M=5.2$ 的地震,也有这种现象。在地区的东部,整个1977年, $K=10-11$ 的地震完全“平静”,虽然“平静”区本身被 K 为10—11的地震所包围,在这样的背景下发生了1977年12月的地震。这一被广泛应用的强震孕育标志,在地球上的其它地震活动区也被观测到。目前确定“平静”区的工作是在电子计算机上用公式化的方法进行的。

研究由震源传播出来的纵波与横波速度给出另一个预报特征。在研究地震波在地区南部不同台站上的传播速度时发现,在1和3台站

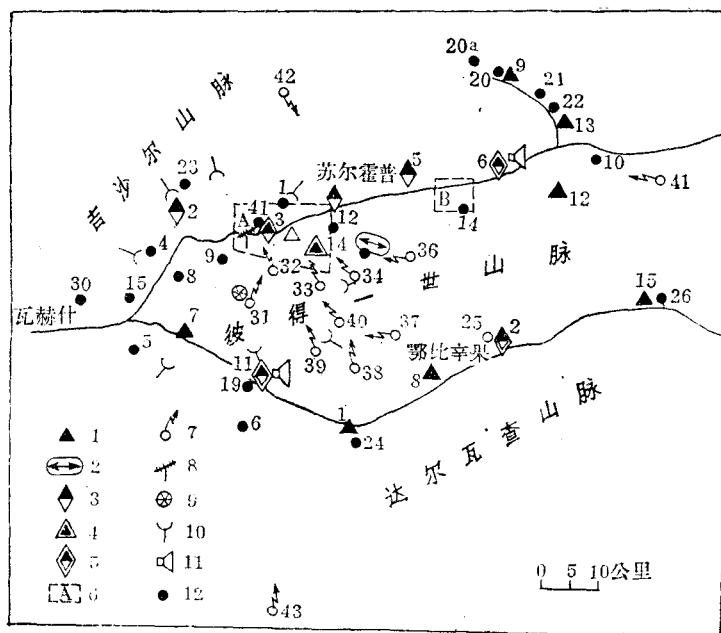


图3 加尔姆预报地区图

1——地震台(CC), 2——MFL-振荡器, 3——有MFL记录仪器的地震台, 4——有形变观测的地震台, 5——有地电仪器的地震台, 6——进行详细大地测量的地区, 7——苏美合作的无线电遥测台站, 8——收集无线电遥测讯号的中心站, 9——光测距台网中心站, 10——光测距仪的反射镜, 11——声学传感器, 12——磁观测站

上, 对不同时期 (平静期, 1973年; 活动期, 1975年), 观测到根据纵波及横波的到时差确定的虚波速度有很大变化, 它大大超过了确定速度的精度。根据普通地质的概念和地震震源机制的定义, 应该说, 速度的不均匀性反应了在构造力作用下地区的各向异性程度。重要的是这个量是随时间变化的。在平静期没有观测到速度的差异, 而在活动期差异急剧增加。图 4 的曲线给出速度随时间的变化。还观察了纵波速度的绝对值、它们之间的差与比值。在速度比和虚波速度的图上, 这些量的异常非常清楚, 它们是与该地区发生强震的时间符合的。这些图是对最“灵敏”的台站 1 作的。引人注意的是: 从 1971 年起出现大的负异常, 迄今仍未结束, 虽然其符号已经改变并接近于正常水平。速度比的这种海湾形变化的结束, 可能对应在最近 2—3 年里会发生震级接近 7 的强地震。在图 4, 6 给出在单轴加载下研究岩石样

品中速度变化的平均结果。在形成微破裂过程中, 由于速度的局部变化, 使得在样品破裂前速度的一般海湾形下降复杂化。定性上实验室的试验与现场观测资料符合得非常好。

弱震机制的研究指出, 由 1964 年开始的这段时期, 小震震源挤压轴的方位发生了重大变化。如果把最经常遇到的机制类型用字母 A 和 B 表示, 则 B 型机制的数量与 1964—1967 年这段开始时期相比已急剧增加, 它说明地区构造情况的变化。另外还观察到地震机制变化特性, 速度比变化及在加尔姆台上形变观测得到的地区“挤压”向量的方向之间的某些关系 (图 4, 6)。

在未来发生地震的地区, 强震前往往要发生弱震-前震。它们对 1976 年 9 月的二次地震表现得很明显 (图 10, 6)。这个判据还远不是常规, 只在约 30—40% 的强震前观察到了。

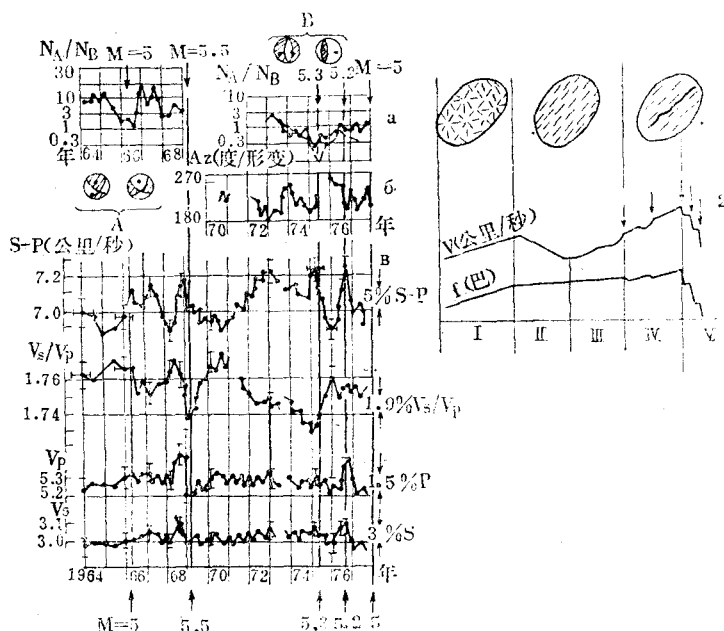


图 4 a——震源机制随时间的变化, 6——在台 3 上形变“向量”的变化, b——不同类型地震波速度的变化, r——试验在单轴压力下地震波速度变化的图示 <Г. А. 索鲍列夫 (Соболев) 等的经验> A, B——最常见的震源机制类型; 形变的不同阶段: I——细孔和细裂缝的部分闭合, 形变是均匀的; II——形成辽阔的弱化区; III——在弱化区应力的集中, 裂缝的部分闭合; IV——在剧烈形变区形成一系列细裂缝, 形成主断裂区; V——主裂缝增大, 应力降低

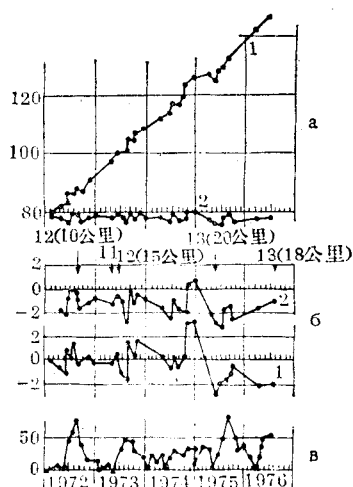


图5 大地测量基点的垂直运动和地震活动性

a——图3上大地测量试验区A的南测点位移(1)和北测点位移(2)；
b——北测点运动的变化(2)和南测点运动的变化(1)；c——在大地测量试验区3个月内弱震个数的滑动平均值

在地震方面还肯定了其它一些量的变化，如弱震的频谱成分，弱震震源的应力降等等。看来还能提到的是声学信号，但所有这些资料现在还要进一步校对。

在测地变化里能最直观地监视地震活动性与地壳形变的关系。在图3上字母A表示进行着高精度的高度测量和水平测量的地区。苏尔霍普(Сурхоб)河谷将这个区分成南北两部分。沿着这条河流发生着该区严重的地方性破坏。在这个区进行着天山和帕米尔山系的连接。在图5给出大地测量试验区南部(1)和北部(2)的平均运动。运动特性的差异在此表现得很明显。在5年里，北部的所有运动只在3毫米范围内，而同一时期在南部相对高差几乎达到70毫米，说明运动的高速率。如果只观察这些运动的性质，则可由第2个图表看出，它们彼此在这方面差别不大，这着重说明地区总形变规律的同类性。

加尔姆地区里与大地测量试验场紧接地段的地震活动水平与垂直运动有完全一致的变化。我们注意到，1975年能级为13的地震是在运动符号急剧变化之后发生的。遗憾的是，在

1976年测量的数量大大减少，再要谈今后地震的情况是困难的。一般，在用大地测量研究前兆时，在世界上很多地区已相当有把握地肯定了运动符号改变这一判据。

就预报目的而言，形变测量十分重要，因为在一系列情况下，借助于它来区分出短期与临震前兆。图6给出了三类曲线：最上面的是形变(矢量)方位角的变化(南北和东西形变分量的矢量表示)，地表东西倾斜分量的变化速度以及形变(矢量)的变化速度。最有兴趣的是后一个图。形变速度的变化与强震发生的相关性最为明显。在这种较长形变过程的背景上，许多情况下观测到快速进行的变化。图6b和c是1977年12月25日加尔姆 $M=5$ 地震前倾斜和形变快速变化的例子。利用这种快速变化，对临震预报至关重要(因它们出现在一天的范围以内)，但这只有在直接运用电子计算机的条件下才有可能，因为靠手工处理，很难有效地把它们区分出来。形变和倾斜的传感器应直接与电子计算机相连，并用它对资料进行连续处理。

根据地磁观测结果，可以深入研究磁场与形变过程之间的关系。图7(a)给出了1974—1976年的地磁观测点。可惜，此项观测周期太长，而且观测对应了1975和1976年 $K=13$ 地震的发震时间也完全是偶然的巧合。两次地震都观测到磁场差值的变化。在基准点3040和其余各观测点之间，用灵敏度为0.1伽的质子旋进仪，对磁场的差值进行同步观测。两次地震时，异常达几个伽。但它们的空间分布是不同的(6)。主要异常在靠近震中的测点12、13、14和8处展现。而1975年异常集中在区域的西北部分，震中以北。在南面和西面的测点上，没有观测到变化。所有这些均表明，每个具体地震条件下，形变区域变化的复杂性。

在靠近测点12的苏尔霍普构造断层的分支上也同时进行了观测。结果示于图7的右边。磁场变化与由大地测量资料所得的急剧垂直运动很吻合，并与地震活动水平有关。最上面的一条曲线，表示与进行地磁和大地测量区域相

连的地区内，弱震活动的特征（活动性按区域和时间统一化）。

自1977年起，在加尔姆预报实验场的全部区域内，进行定期的地磁测量（图3）。于4—5月份，几乎在所有台站上都观测到有意义的磁场变化。此后，在6月份发生了3次 $M=4$ 的地震，其中的一次靠近测点26，另两次靠近测点19。下半年仅在南面的几个测点（19、25、26）上观测到磁场的显著降低。由于气候条件所限，在12月份几乎没有进行观测。1977年12月25日在测点25以北15公里处发生了强烈地震。

显然，对 $K=13$ 的地震，所研究区域的大部分均属孕震区，因此，在预报实验场范围内，现有基本观测点可能不完全合适。为了校验基准点本身对所进行的测量特点的可能影响，在相距较远的加尔姆和杜尚宾地区的测点之间（150公里），进行了对比测量。两分钟观测数据按小时间隔来平均。对比实验的结果表明，7月底场值相差1伽玛。若考虑这个变化，则

在12月地震前，整个加尔姆地区内的所有区域，特别是在南面的观测点上，异常会表现得更清楚。1975—1977年地磁观测资料的对比表明，磁场变化可用于短期和临震预报。

为研究地壳的视电阻，1976年在加尔姆预报实验场，开始使用磁流体动力发电机（帕米尔-1）进行观测。图8给出了观测示意图及测量的某些结果。遗憾的是：由于技术上的原因，未能作到连续观测；不过取得的资料对预报地震有极重要的意义。1976年第一次强地震于7月10日发生在北区。分布在北区的大部分接收站上，都观测到视电阻值下降。当时，分布在南区的台站2上，没有见到负异常特征。下一个更强的地震于9月3日发生在磁流体发电机与台站2之间的区域中央部分。正是在这个台站上，我们观测到近乎达20%的异常。而在北面的台上，当时异常不超过测量精度 $\pm 2.5\%$ 。在发电机与台站3之间，于12月19日发生了最后一次较弱的地震（ $K=11$ ）。对此地震，北面的台上曾观测到微弱的电阻变化。

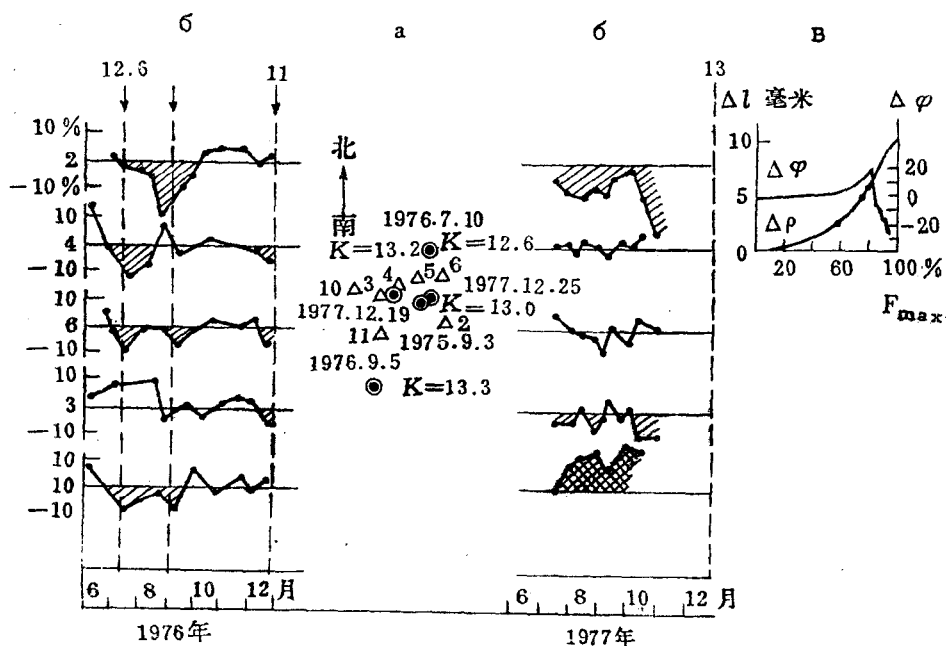


图8 磁流体发电机观测点和震中相对于接收点位置图。试验进行期间视电阻的变化特点
a——观测系统；b—— ρ_k 变化，坐标轴旁数字标出了台站编号，对分布在发电机和台站间的震中，台站2上变化最大；v——岩石样品在破坏时电位变化特征[据 И.С. 托马舍夫斯基 (Томашевский) 的实验]。

1977年7月又重新恢复观测,并一直持续到10月下半月。12月的 $K=13$ 地震亦发生在发电机和台站2之间。而在10月就已开始形成了相当大的磁异常。由于发电机工作中断,致使我们无法深入研究这种异常的特点。北面的台站对这次地震反应很小。在台站10上存在的大负异常,目前还没有得到解释。

我们注意到,当岩石样品受剪切荷载时,与样品应力状态变化有关的岩石电位和电阻的改变(图8),它与在自然条件下观测到的视电阻的变化相类似。

1977年下半年,在加尔姆、丘萨尔(Чусал)

和切里-多拉(Чиль-Дора)台站的三个点上,开始观测大气电现象。8月8日,在切里-多拉台附近发生了 $K=11$ 的地震。12月25日地震前,在所有三个台站上都观测到强烈的信号。电信号最早出现在离震中最远的切里-多拉台,然后是加尔姆台,最后是最远的丘萨尔台。图9给出了信号传播特征(示意)。约在震前一天,观测到最大的扰动。在切里-多拉和丘萨尔两个台上,记到25次单个脉冲(在最佳的天气条件下),但在震前8—10小时,所有三个台上都未观测到任何变化。

估计这些观测与地震前的大气发光资料有

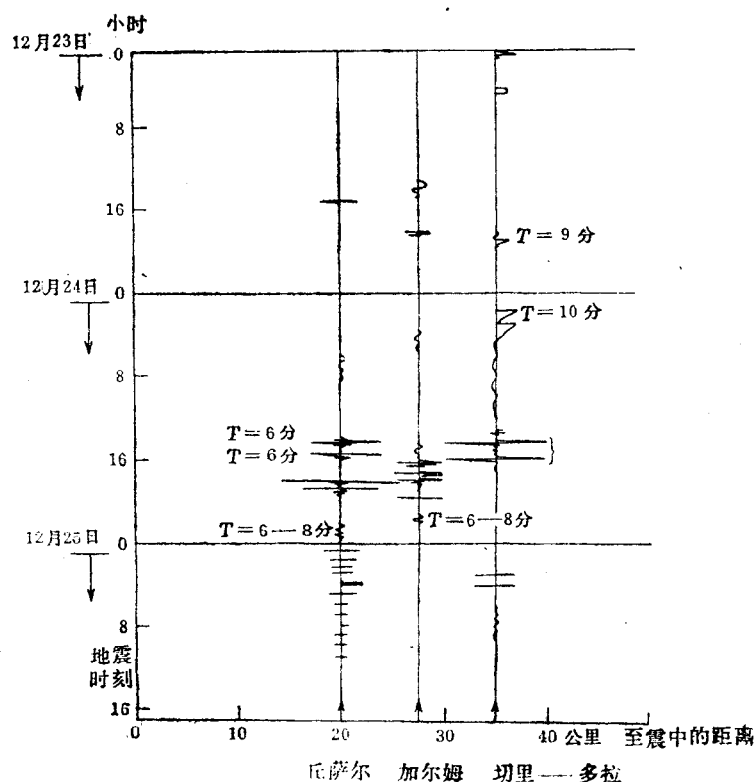


图9 地震前大气电流记录的例子。记录信号示意图。

关。仅根据两次观测还难以判断所得资料的意义。有必要进一步扩充观测网,并改进记录系统,以便能更清晰地表现出观测信号的特征。

图10示出1976和1977年地震前某些异常的总和。纵、横波速度比是长期前兆;形变速度和视电阻的变化,以及地震的(平静),是短期前兆;对1976年的地震,磁场变化和前震是临

震前兆,而对1977年12月的地震,倾斜和形变的快速度化,以及大气中的电信号是临震前兆。磁场的变化(对于距基本观测点较远的所有区域,磁场变化一般减小,而南部地区异常增强),亦可列入1977年观测到的前兆总和之中。

因此,长期前兆(弹性波速度)给出〈平静〉地区——可能发震区的一般危险情况的信

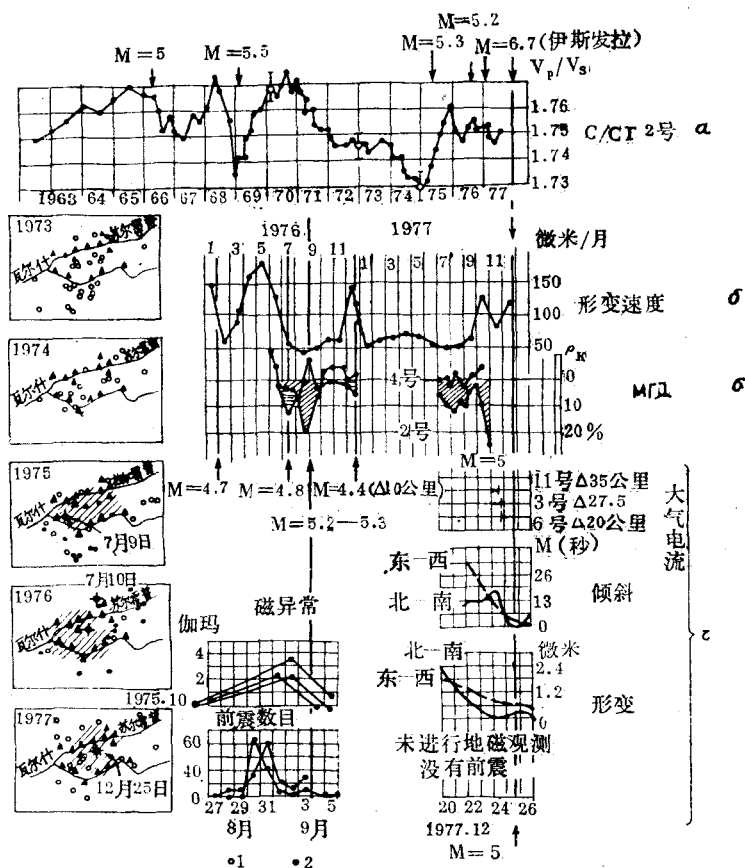


图10 M=5地震前加尔姆地区震情的变化。阴影区表示震前的<平静>区域。

1——K=10—11地震震中；2——1975年7月9日地震后至1976年7月10日地震前的震中。1976年9月3日和1977年12月25日地震前一系列参数变化的综合图：a——波速比 V_p/V_s 的长期变化；b——台站3的形变速度的短期变化；v——台站2和台站4的视电阻的短期变化；r——1976年9月3日前震和磁场的临震前兆，1977年12月25日地震的地电流、倾斜和形变。

息，形变速度、视电阻及磁场帮助预测孕育着的地震，而地面倾斜、地壳形变及大气电流的快速化给出相当准确的发震时间。

当然，要在大范围保证这样密度的地球物理观测是不现实的。看来，是不可能，也不需要这样做，因为对强地震来说，前兆作用的范围是很大的（图2）。有必要在各共和国首都和大工业区建立装备完善的实验场，并在其它地区建立单独的基准地球物理观测体系，因为，使我们首先感兴趣的6级以上的地震有相当广泛的孕育区，而且在这些区域里发生的变化将会在有些实验场和某些基准观测站上记录下来。在受到地震威胁的地区，可以在短期预报的基础上，开展补充的观测（图1）。

从技术观点看，实际预报的最复杂的问题，是保证各测点和数据处理中心之间可靠的通讯联系，缺乏这种联系，预报出强地震是困难的。

1976和1977年加尔姆实验场预报观测试验表明，对发震的位置、强度和时间作出临震预报是完全可能的。同时，从取得的工作经验中可以得出如下结论：利用现代计算技术，高效率地处理输入的地球物理资料，是绝对必要的。

译自：《Физики земли》1978年第9期，第13—30页

原题：Вопросы прогноза землетрясений

作者：М.А.萨多夫斯基 (М.А.Садковский)

И.Л.尼尔赛索夫 (И.Л.Нерсесов)

(肖蔚文、朱传镇译，靳君达校)

地震预报

在风暴,干旱和其他一些自然灾害中,地震是最可怕的,也是人们了解得最少的一种灾害。或许正因为如此,地震才深深地混杂在几乎一切古老民族的宗教信仰中。例如,古代的中国人认为地下有条鱼在摇晃着地球。早期的印度尼西亚人认为是他们的上帝偶而摇动着地球,不时地提醒人们别忘记他的权势。

每天要发生数千次地震,这种情况已持续了几十亿年了。世界上的大震都只是每隔两年或三年才发生一次。然而,由于人们为了共同防御和便利都集中在城市中居住,这样就使人类的文化越来越容易受到地震的破坏。在人口高度集中的地方发生大震,几秒钟内就可产生巨大的破坏。1556年中国陕西省的一次大震就死亡了800,000人。1775年在当代的一个大城市里斯本,由于地震全部遭到破坏,并且死亡人数很多。

20世纪时,象东京和旧金山都曾被地震夷为平地。在这些例子中,许多破坏不是由于地震本身造成的。而是由于煤气或电线着火而灭火能力失灵,使火灾无法控制造成严重破坏。

现代城市越来越依赖于精心设计的电力传送和通讯联络网,这就使得地震造成的灾害更加严重。可以认为,在地震机制得到充分地理解和能相当可靠地作出地震预报之前,可以说当今世界上没有一个城市——只要它位于地震区,可以逃避这种灾难。直到差不多10年前,地震预报还是占卜者的事。近来,随着人们对地震成因的认识逐步提高,地震预报才成为科学研究中一个令人可敬的领域。

地震成因

地震在地球上并不是任意分布的,它们都集中在一条狭长的连续的地震带上。几条地震带汇合,围成一个很大的无震区,这些地区就

是所谓的岩石层板块。这些板块相互以每年数厘米的速度连续地相对运动。正是这些板块运动造成了包括地震活动在内的地质活动。

板块运动的发生是因为地球外层的又冷又硬的岩石圈裹在一个又热又软的软流圈上。由于地球内部的放射性物质衰变而散发的热使得软流层处于热对流中。这种对流把岩石层分离成若干板块,它们随着对流运动而运动。这些板块运动在洋脊处分开。岩浆从由运动产生的孔隙内涌出,并且凝固成新的海底。我们把这种在洋脊连续产生新海底的过程就叫做海底扩张。

由于新岩石层不断地通过这个过程在洋脊处产生,所以必定有一个大小相同的岩石层会在某处消亡。这个过程是发生在板块汇聚的深海沟处,在这里海洋岩石层插入软流层并在那里溶化。想来一部分溶化的物质是供给发生在深海沟后的火山弧的岩浆。

然而在两个大陆猛撞的地方,由于密度较小的大陆物质受到较大的漂浮力,而阻障了岩石层向下俯冲,在这种碰撞力作用之下,岩石层变形,形成象阿尔卑斯山和喜马拉雅山这样巨大的山脉。在板块相对运动平行于它们共同边界的地方,沿着板块边界大断层发生滑动,如加州的圣安德烈斯断层。

根据板块构造理论,板块运动就类似于浮冰在极冷的水中运动。在冰块岔开处,由于裂隙张开,水从下面涌出来,碰到浮冰就冻结并产生新的浮冰。在浮冰集中处压力脊的形成类似于板块集中处山脉的成长。

黏滑摩擦和弹性回跳

当板块相互移动时,在它们的边界上发生的不是连续的滑动,而是一系列急速地跳动。每一次跳动就是一个地震。急跳运动的发生是因为在地球浅部岩石层的压力和温度条件下,

岩石显示出通称为黏滑的性质,这种摩擦滑动发生在一系列急跳的运动中,中间夹有一些不动的时期。因此在地质时期的画面上,岩石层板块在它们的边界颤动。在任何地方,这种颤动之间的时间间隔大约是几百年。

在两次大地震之间的时间里,板块的连续运动使应变在板块边界附近缓慢地积累。当板块边界的摩擦力超过板块边界的摩擦强度时,应变最终就通过发生地震的方式突然释放出来。这个关于应变积累和释放的模式是里德(H.F.Reid)在研究1906年旧金山地震时提出的。那次地震时,圣安德烈斯断层从曼迪锡诺到旧金山南边吉尔罗伊镇这400公里长的区间内,平均滑动了3.7米。当重新测量这个地区时,发现断层的西边相对于断层的东边已向北移动,而在断层之东或西(图3)32公里以外没有找到移动的证。但是里德注意到了在1906年以前约40年所作的测量,发现远离断层西边的那些点以缓慢的速率向北移动。根据这些线索,他推导出弹性回跳理论,根据这个理论,由于板块的缓慢运动,使原来无应变的岩石发生形变,直到一次地震(粘滑)发生使岩石恢复到一个无应变状态。

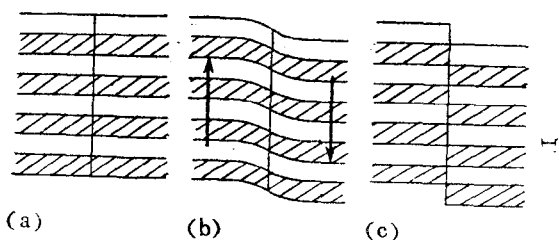


图4 弹性回跳理论的示意图。(a) 未受应变时的岩石 (b) 由于受到两个板块之间相对运动而变形,使得断层带内发生应变,最后变得很大,致使 (c) 岩石破裂和回跳到新的未受应变时的状态。

地震的特征

地震尺度的变化很大,小的颤动可在几英尺断层上发生零点几英寸的滑动;大震可涉及到几百英里长的破裂和几十英尺的滑动。地震时地面运动加速度可高达 $1g$ (重力加速度)。

地震时断层两侧的移动速度只有 $0.45-4.5$ 米/秒,但是破裂锋沿断层传播的速度将近 2235 米/秒。

地震波 地震的主要破坏是由地震波造成的,而地震波是一种由地震的急速运动所激发的通过地球的声波。大震时,地震波辐射出来的能量大的可达万亿卡,而在地面运动的几秒钟内所放出的能量大的可达十亿兆瓦。

地震震级 一次地震的大小,可用它的震级来表示,而震级则是由它所产生的地震波来确定的。震级为 2.0 的小震,大概是最小的有感地震。大多数破坏性地震的震级在 6 级以上;已经测量到的最大地震震级为 8.9 。因为它是对数尺度,所以一个 7 级地震的能量大约为一个 6 级地震的 30 倍和一个 5 级地震能量的 30×30 或 900 倍。由于地震大小随震级急速增加,因此只有最大的地震(震级大于 8)对板块运动才有明显的影响。而通常发生的那些较小的地震对板块运动过程来说是不重要的。

板块内地震

虽然大部分地震发生在板块边界,但是人们知道地震也偶尔地发生在板块之内。在美国直接与板块运动相关联的地震只有太平洋沿岸的地震。然而,从邻近地区过去发生的地震分布图上可以看到,地震在其他地区也偶尔发生。虽然这种板内地震也可能是由推动板块的同一对力量产生的,但是还不知道产生这些地震的直接原因。有些板内的地震震级很大。人们知道 1811 年和 1812 年在美国新马德里附近,密西西比谷发生过最大的地震。另一个板内地震发生在 1886 年,对查尔斯顿造成了中等程度的破坏。

地震危险评定 显然在紧靠板块边界附近地震破坏的危险性最大。甚至在板块边界,地震活动变化也很大。看来象岛弧这样的汇聚性板块边界的地震危险性要比象洋脊这种其它类型的板块边界的地震危险性高,后一种情况下,板块分开或者横切边界运动,以加利福尼亚的圣安德烈斯断层为例,它的运动就是平行于断