

活断层的定义与分类

——历史、现状和进展

吴中海

活动构造与地壳稳定性评价重点实验室, 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

摘要: 活断层是在最近地质时期持续活动, 并且未来仍将活动的断裂。活断层作为破坏性地震的主要危险源及其可能衍生的多种潜在灾害作用, 意味着它的存在对所在区域的城镇发展和重要基础设施建设都存在难以回避的灾害风险问题。而中国是世界上活断层数量多且遭受相关灾害影响特别严重的国家之一, 如何科学评价活断层危险性且有效减轻相关的灾害风险必然是我国经济社会发展中长期面临的重大课题。而活断层定义和分类是评价活断层灾害风险的重要依据。在全面系统地梳理分析国内外在这一领域的历史与现状基础上, 介绍并总结了代表性国家和地区、相关的规范标准以及活断层编图与空间数据库建设工程等所采用的活断层定义和分类方案。综合分析与对比结果表明, 在制定科学合理的活断层定义及分类方案时, 必须综合考虑区域的现今构造动力学背景、现有技术手段及地质上的可操作性、应用目的和社会对活断层风险的可接受程度等因素。活断层定义的关键是过去活动时限及潜在发震能力的选择或确定, 前者涉及“新构造、第四纪、晚第四纪、全新世和历史上”共5个不同时间尺度, 后者包括“ $M \geq 5.0$ 的破坏性地震、 $M \geq 6.0$ 的强震和 $M \geq 6.5$ 的可能产生地表位移或变形的地震”共3类。晚第四纪和全新世等短时间尺度的活断层定义适合应用于构造活动强烈的板块边界带, 但第四纪和新构造等长时间尺度的活断层定义在板内变形区和稳定大陆区, 或包含了多种不同活动构造域的区域更为可取。而 $M \geq 5.0$ 地震适用于作为区域性防震减灾的震级标准, $M \geq 6.5$ 地震一般可作为活断层避让规范或法规中的标准。

国内外最常见的活断层分类方案是基于断裂活动强度与频度(主要通过断层滑动速率与地震复发间隔两个定量参数来体现)和活动时代的分类。但在确定不同级别断层的具体定量参数时, 需要综合考虑区域内主要活断层活动强度和活动时代的差异性与现有数据的多寡及有效性, 从而达到分类方案可有效区分不同级别活动断裂的目的。另外, 活断层评价中还经常涉及活断层的活动性与危险性问题, 前者反映的是断裂过去的活动状态, 主要通过断层的最新活动时间、平均滑动速率和大地震平均复发间隔等定量参数体现, 而断层的危险性主要针对的是活断层在人类社会所关心时段内或工程寿命期内, 断裂活动可能造成的灾害及其风险程度, 需要在判定断裂活动性基础上, 进一步明确未来强震可能出现的位置、震级的大小、地表断层的分布以及一旦发生强震可能造成的地质灾害类型及分布等, 通过合理区分出断层的危险性为政府管理部门和工程规划建设部门有效减轻、防控或管理活断层灾害风险提供更具实用性的依据。目前, 世界上活断层比较发育且灾害影响显著的典型国家和地区都十分重视全国范围内的活断层普查工作, 并把综合编制可更新的且公开共享的全国性活断层图及空间数据库作为长期且重要的基础地质工作, 以及有效应对活断层灾害风险和服务社会的重要方式。其中美国西部地州和新西兰等制定的活断层避让法规或规范, 非常值得活断层数量多且相关灾害问题突出的中国或类似的国家和地区借鉴。

关键词: 活断层; 新构造; 能动构造源; 地震复发间隔; 地震危险性评价

中图分类号: P546 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2019.051001

本文由国家自然科学基金项目(编号: 41571013)和中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20160268; DD20190396)联合资助。

收稿日期: 2019-04-15; 改回日期: 2019-05-09; 网络首发日期: 2019-05-13。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 吴中海, 男, 1974年生。博士, 研究员。主要从事新构造与活动构造研究。

E-mail: wzhh4488@sina.com; wuzhonghai@geomech.ac.cn。

The Definition and Classification of Active Faults: History, Current Status and Progress

WU Zhong-hai

*Key Laboratory of Active Tectonics and Crustal Stability Assessment, Institute of Geomechanics,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081*

Abstract: Active fault is generally defined as a fault that is expected to cause sub-surface deformation or destructive earthquakes ($M \geq 5.0$ shallow earthquakes) in the future, and is treated as the main hazard source of destructive earthquakes and related potential hazard effects. The presence of active faults means unavoidable disaster risk for urban development and important infrastructure construction along the fault zones. China is one of the countries with a large number of active faults and is particularly affected by related disasters in the world. How to scientifically evaluate the risk of active faults and effectively mitigate the related disaster risks is bound to be a major issue in China's long-term economic and social development. The definition and classification of active faults is an important basis for evaluating the hazard risk of active faults. Based on a comprehensive analysis of the history, status and progress of the definition and classification of active faults, this paper summarizes the definition and classification schemes of active faults used in representative countries and regions as well as in some relevant standards, active fault mapping, construction of spatial database and some other fields. The comprehensive comparison results show that the reasonable adopting of definition and classification of active faults must take into account the current tectonic dynamic background, existing technical means and geological operability, application purpose and social acceptability of active faults risk in a specific area. The key parameters are the past activity time limit and the potential seismogenic ability in definition of active faults. The former usually involves five different time scales, i.e., Neotectonic, Quaternary, Late Quaternary, Holocene and historical process, whereas the latter generally includes three classes, namely, $M \geq 5.0$ destructive earthquakes, $M \geq 6.0$ strong earthquake and $M \geq 6.5$ which may produce the surface displacement or deformation. The definition of active faults using short time scale, such as late Quaternary and Holocene, is usually suitable for the plate boundary zone where tectonic activity is strong, but it is preferable that active faults are defined as long time scale of Quaternary and neotectonics in the intraplate deformation region and stable continental region, or a large region that contains many different active tectonic domains. The magnitude standard of $M \geq 5.0$ earthquakes is generally applicable to regional earthquake prevention and disaster reduction in many countries or regions, but the $M \geq 6.5$ earthquakes generally is used as the standard in the rules or regulations of active fault avoidance.

The most common active fault classification schemes in many countries or regions are based on the degree or frequency of activities of fault, which mainly are reflected by the two quantitative parameters of fault slip rate and earthquake recurrence interval as well as by activity epochs. However, when determining the specific quantitative parameters of different active levels of faults, it is necessary to comprehensively consider the differences of activity degrees and epochs of faults in the study region as well as the amount and validity of existing data so as to achieve the purpose of classifying different active levels of faults effectively. In addition, the degree of activity and hazard of active faults are often involved in the risk assessment of the active fault. The former reflects the fault activity state in the past, and involves some quantitative parameters including the latest activity time, the average slip rate and the earthquake recurrence interval of active faults. The potential risk of active fault is aimed at the disaster that the active faulting may cause and its degree of risk in the coming period that the human society is concerned with or in the project life period. The risk needs to be evaluated on the basis of determining the degree of activity of faults; the position, size of the magnitude, the distribution of the surface rupture or deformation zone of the future strong earthquake, and the types and distribution of geological hazards that may be caused by the strong earthquake should be further clarified. Therefore, the reasonable distinguishing of the risk degree of active faults is a more practical basis for effective reduction, control or management of active fault disaster risk by government management and construction departments of the infrastructure construction project. At present, many typical countries and regions affected by the active faulting and related hazards have attached great importance to the planned and nationwide active fault surveying, and the comprehensive compilation of updated and publicly shared national active fault maps and spatial databases have been generally considered as important basic geological work and effective measures to cope with the long-term active fault disaster risk as

well as the most important way to serve the social security. The authors hold that the active fault avoidance regulations made by the western continental states of the United States and New Zealand are worthy of reference by China or similar countries or regions which have a large number of active faults and prominent related disaster problems with the purpose of effective mitigation of the risk of active faulting in urban planning and important infrastructure construction.

Key words: active fault; neotectonics; capable tectonic source; earthquake recurrence interval; seismic hazard assessment

活断层又称活动断裂(Active fault),通常是指在最新的地质时期持续活动,并且未来仍将活动的断裂。活断层是破坏性地震的主要危险源,它的存在意味着潜在的断层灾害风险问题,尤其是具有难以预测性的地震及相关的潜在危害威胁,主要包括:断层突然活动引发的地表破裂,地震及伴随的崩塌、滑坡、落石、雪崩、堰塞湖、泥石流、砂土液化、地陷与地裂缝和地下水变化等,以及断层缓慢运动造成的地表错动及地面沉降等(吴中海,2018)。因此,对于重要的交通设施、大型水电工程坝址、核电站与核废料处置场址等,以及人口密集的城镇区,活断层灾害及其风险一直是备受关注的重大安全问题。尤其是发生在城市下方的大地震及伴生灾害是对其安全性的重大潜在威胁,这在历史上相对发达的城市都出现过许多惨痛教训,如:美国1906年旧金山7.8级地震和1994年洛杉矶北岭的6.6级地震,日本的1923年东京8.1级地震和1995年阪神7.3级地震,土耳其的1999年伊兹米特7.4级地震,以及我国的1976年唐山7.8级、1999年台湾集集7.6级和2008年四川汶川8.0级地震等,都造成了极为严重的人员财产损失。

由于坐落在活断层上的建筑或基础设施在地震中往往损坏最严重,并且目前尚无有效方法抵抗因断层造成显著地表错动而对建筑物造成的严重破坏,因此活断层避让通常被视为重要城镇区从根本上避免危险活断层灾害风险的有效方式,这也是当前美国西部多数州县及加州地区和新西兰等所采取的减轻活断层地质灾害风险的重要措施。无论是从城市规划避让活断层的角度,还是出于重大基础设施或工程选址防范活断层灾害风险的需要,鉴定活断层、调查研究其现今活动性以及评价其潜在危险性等,无疑都是重要的基础性地质工作,也是区域地震危险评价的重要内容。但开展这方面工作经常面临的首要问题是活断层的定义和分类,然后才是活断层的分布与活动性如何、可产生什么类型的灾害,以及这些灾害可能的位置、影响范围、规模和潜在风险大小等一系列问题。

由于服务对象和应用目的不同,再加上对活断层风险的可接受程度差异,许多学术团体和政府管

理部门为了规范活动断裂勘测行为,都制定了专门的活动断裂勘察技术规范和行业标准等,如:美国原子能委员会(US Atomic Energy Commission(US AEC), 1973)、美国核管会(US Nuclear Regulatory Commission(NRC))(US NRC, 1997, 2007)和国际原子能委员会(International Atomic Energy Agency (IAEA), 2010, 2015)先后制定的与核电及核废料选址相关的规范标准;美国加州水资源部关于水坝安全的断裂活动性调查指南(Fraser, 2001);中国地震局的活断层填图标准(中国地震局, 2005);中华人民共和国岩土工程勘察规范国家标准(中华人民共和国建设部, 2009)等等。但从不同国家、地区或机构,或同一国家不同部门制定的与活断层相关的法规、规范或指南中可以发现,它们所采用的活动断裂定义与分类常常不同,有时甚至是矛盾或混乱的,这种现象无疑给使用者带来了许多困惑。因此,了解为什么有不同的活断层定义与分类方案,如何针对不同的地质背景和应用目的制定或采用更合理的定义与分类,这显然是获得可靠的活断层灾害风险评价结果和科学制定相关法规或规范的重要前提。因为不合理的定义既可能将原本危险的活断层排除在外,从而无法起到有效规避风险的目的,也可能人为地增加活断层鉴定的难度甚至失去可操作性。另外,从不同角度对活断层进行分类评价则是防范活断层灾害风险的重要依据,合理的活断层分类也是直观表达断裂活动性或其危险性差异的重要方式。鉴于我国是世界上活断层特别发育且断裂体系特别复杂,并受活断层灾害影响极为严重的国家。因此,如何科学评价活断层危险性且有效减轻相关的灾害风险必然是我国经济社会发展中长期面临的重大课题。这里希望能够通过分析对比国内外关于活断层定义与分类的现状及应用进展,进一步探讨在应用和制定活断层定义与分类方案时应注意的主要问题,从而为我国不同行业或部门在应用中能够根据自身需求科学采用活断层定义,并合理制定活断层分类方案提供参考和借鉴。

1 活断层定义

1.1 活断层的基本定义

“活断层”术语最早由美国地质学家劳森

(Lawson, 1908)对 1906 年旧金山 8.3 级地震的发震断层圣安德列斯断裂进行研究后提出。之后,美国地质学家伍德(Wood, 1916)和威里斯(Willis, 1923)先后给出了比较明确的定义:活断层是在近代或历史时期内新生或有过继承运动和位移,及在不久的将来仍可能再生或继续运动和产生位移的断层,并指出活断层应具有 4 个基本要素。

(1)在现今地震构造时期中曾出现过地表位错;

(2)具有在未来复活或重新发生地表位错的可能性和倾向性;

(3)可以从地貌学(以前称“地文学”)角度发现其具有近代活动性的证据;

(4)可能伴随有地震活动性。

虽然地质学家很早就提出了较明确的活断层定义,但使用中仍一直存在混乱和争议(丁国瑜, 1982; 易明初, 2003),尤其是在界定活断层时间下限和确定其未来活动性方面存在很多不同认识,并在实践中给出了许多不同的定义,并且还经常将活断层与地震断层及新构造等等术语相关联或等同。如:劳德巴克(Louderback, 1950)曾提出,活断层是“现在正在活动或在近代地质和历史时期曾有活动,并在未来有复活倾向的断层”。前苏联著名地质学家尼古拉耶夫(1965)将晚第三纪—第四纪期间形成的、决定现代地形基本轮廓的各种构造作用和构造变动称为新构造运动,而将新构造运动期形成的构造变形统称活动构造(Active tectonics),其中的断裂构造统称为活动断裂。美国地质学家克拉夫(Cluff, 1964)曾提出(转引自 Slemmons and McKinney, 1977),活断层应该具有“地质的、历史的和地震的”3 类证据,包括“近代地质时期具有确凿活动证据的断层,断层必须切割冲积扇或冲积层等现代沉积;或在历史时期中出现过地表错动的断层;或显示有地震活动沿断裂分布的证据”。美国地质学家艾伦(Allen et al., 1974)认为,活断层主要是最近 10 万年或 1 万年曾有过多次活动的断层;谢拉德等提出(Sherard et al., 1974),可将影响水库坝址安全的潜在活断层定义为“具有在近代地质时期曾发生位错的充分证据,并在水坝寿命期(约 100 年)可能再次产生地表位移的断层”。日本地震地质学家松田时彦(Matsuda, 1977)指出,活断层可定义为“第四纪或晚第四纪多次活动,并且今后可能再次活动的断层”。

事实上,正如活动构造研究的先驱之一美国地质学家华莱士(R. E. Wallace)所言(Wallace, 1981, 1986),对于包括活断层在内的活动构造而言,人类社会最关心“是否会在人类社会关注的时段内继续活动并造成灾害的构造变形过程”,而已有的活断层定义中关于“断层是否在最近的地质时期内反复

活动或现今正在活动”的表述实际上是判定活断层的准则,而不是定义本身。例如对大坝、电站等重大工程选址而言,最关注的其实是在其设计使用年限内(通常是百年尺度)是否可能存在断裂活动并造成灾害,以及它的危险性如何。因此,将活断层定义为“在人类关心的未来仍可能活动的断层”应该更为合理(Grant et al., 2003)。但由于一些断裂的活动周期可长达数千年至数万年,甚至十万年或以上(Machette, 2000),因此预测断裂在未来或百年内的活动性,仍必须通过研究或了解它在最近十万年乃至百万年时间尺度内的活动过程与特性。

1.2 活断层的时限

活断层属于典型的实用性术语,因为调查研究活断层的重要目的之一是确定其未来活动性,从而为地震危险性评价提供必要的地质依据,而断层未来的活动性必须通过了解它在“过去”和“现在”的活动过程来推断。因此,研究活断层首先面临的问题是:究竟需要了解什么时间以来的断层活动历史才能够得到更可靠的有关断裂未来活动性的结论。这就是活断层定义中的时限问题。

在早期的定义中通常没有给予明确的年代限定,主要强调了“在最近或最新的构造阶段发生过多次活动的断裂”,定义中常见的是“最近地质时期”、“当前的或现今”、“年轻的”和“历史的”等时间性相对模糊的用语,这显然会因理解上的不同或使用目的不同(如地质学、地震地质学、工程学和法律法规与规范等)而被赋予不同的时限。但对于标准规范和立法而言,为保障其严谨性和可操作性,在定义中给出活断层时限是十分必要的(Wallace, 1986; Yeats et al., 1997)。如:美国原子能委员会(US Atomic Energy Commission, 1973)定义的能动断层,即“在过去 35 ka 年至少错动过一次或过去 0.5 Ma 以来多次错动的断层”;美国加州 Alquist-Priolo(AP)特别调查带法案(1972 年实施)采用的“在全新世期间(距今约 11 000 年以来)具有地表位移的断层”和加州水资源部“断层活动性指南”(2001 版)采用的“35 ka 以来发生过地表错动的断层”等(Fraser, 2001; Bryant and Hart, 2007)。而国际地震与工程地震手册(International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology)中采用的活断层定义则包含了 3 个不同时间尺度的时限,定义是“历史上(指有人类历史记载以来)、全新世(约 10 ka 以来)或最近地质时期(约 0.5 Ma 以来)曾经活动的断层”,并指出断层的活动方式既可以是地震活动也可无震滑动(或蠕滑)(Aki et al., 2003)。

综合对比国内外已有的活断层定义可以发现,它们主要强调了断层在“地质历史”(即过去)、“现

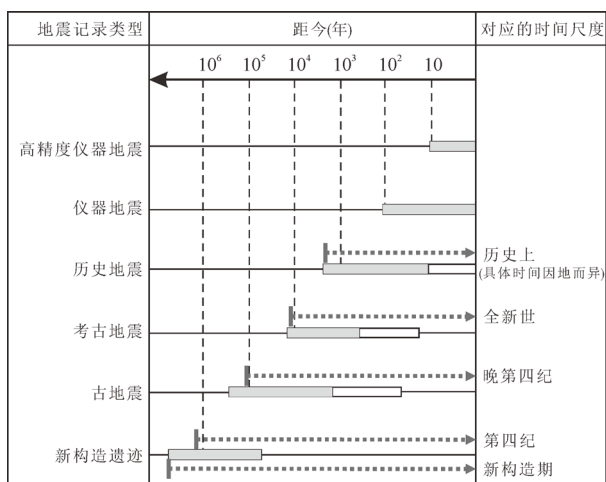


图 1 活断层的时间尺度及所对应的地震记录方式
(修改自 Gürpinar, 1989)

Fig. 1 The time scale of active faults and corresponding seismic recording mode (modified after Gürpinar, 1989)

今”(近百年或十年尺度)和“未来”3个不同时段的活动性,由于断层的现今活动性可通过断裂上的历史或仪器地震记录加以限定,因此,因研究和应用目的不同和理解上的差异,关于“活断层”定义的差异更多地集中在对“过去”的时间限定上(Machette, 2000; Galadini et al., 2012),常见的时限或采用的时间点主要集中在5个不同时间尺度上(图1)。

(1)新构造期(主要指新近纪以来):具体时限涉及0.5–0.7 Ma、2.0 Ma、3.4 Ma、5.3 Ma和15 Ma等不同时间点,但主要是上新世以来;

(2)第四纪(距今约2.6 Ma以来):包括1.6 Ma、2.0 Ma和2.6 Ma等不同的时间点;

(3)晚第四纪(中更新世或距今约50万年以来或距今约15~10万年以来):这是应用最多,也是争议最多的时段。其中强调中更新世以来活动的,采用的时限通常有0.5 Ma或0.7–0.8 Ma;强调晚更新世以来的时限包括35 ka、40 ka、50–80 ka、100 ka、100–120 ka、120–128 ka、130 ka和150 ka等;晚更新世晚期以来,时限包括15 ka、24–16 ka或20 ka。目前活断层定义中最常见的是采用“晚更新世以来”作为其过去活动的时限。

(4)全新世(距今1.1万年以来):具体时限包括:4–6 ka、10 ka或11.5 ka等。

(5)历史上:具体时限因不同国家或地区历史记录的时间长短而不同,但一般在千年左右(图1)。

综合以上不同时限不难看出,不同的定义或观点在鉴定断裂过去的活动性时,实际上强调了时间尺度的不同,主要涉及百万年(长时间尺度)、十万年至万年(中等时间尺度)和千年至百年(短时间尺度)3类不同的时间尺度(图1),而且不同时间尺度多对

应的地震记录方式也相应不同,或对应研究活断层地震历史的不同角度(Gürpinar, 1989)。

实际上,虽然时限对于鉴定断层活动性十分关键,但其本身只反映断层过去活动的历史,而不能直接决定断层未来是否仍会发生活动。因此,采用单一时限来定义活断层在许多情况下可能是不适合的,而应用中具体采用什么时间尺度或时限作为限定活断层的过去活动历史,还需要综合考虑区域的地球动力学背景和活动构造环境、应用或研究的目的、防灾减灾的实际需求和地质上的可操作性等多种因素(Machette, 2000; Galadini et al., 2012)。在美国,以服务“减轻国家地震灾害计划”而成立的西部州地震政策理事会(Western States Seismic Policy Council)(WSSPC)针对美国西部“盆岭地貌区”(Basin and Range physiographic province)(BRP)多个地州制定减轻活断层灾害风险相关政策法规的需要,不定期公布的“盆岭区最新地表断层作用定义”的建议可以说是这方面的最好例子。该建议专门指出,在美国盆岭区,“足以引起地表错动的断层作用”一般对应 $M \geq 6.5$ 地震,而该区包含了上千条活动断裂,多以伸展和扭张构造变形为主,并且断裂活动性具明显差异,采用单一时限来定义活断层显然是不适合的。因此,建议该区的州和地方政府在制定涉及活断层问题的规范指南或法规政策时,建议采用时段不同的3类活断层定义(具体定义后述):第四纪活断层、晚第四纪活断层和全新世(或晚更新世末-全新世)活断层(WSSPC, 2015)。WSSPC在该方案中特别指出,同时采用3个不同活断层时限的主要依据是(WSSPC, 2015): (1)第四纪(≤ 2.6 Ma)是地球科学界普遍认为与活动的或危险的地震断层最为相关的地质时段,它代表着当前冰期/间冰期气候旋回为主的气候变化过程的开始,也是盆岭区主要地表沉积物和现今地貌形态形成的主要时期,区域内所有已知发生过历史地表断层作用或地震破裂的断层都存在第四纪地表断层作用,并且这一时段足以囊括盆岭区内具有产生 $M \geq 6.5$ 地震活动潜能的所有断层的平均重复活动间隔; (2)在盆岭区内广泛分布着已被很好定年的、以邦纳维尔湖(Bonneville lake)和勒亨坦湖(Lahontan lake)沉积物为代表的晚更新世末至全新世(≤ 15 ka)沉积,因此,地质学家可以该套沉积和相关的地貌体为年代标志,进而根据断裂是否明显错动该时段沉积物来很好地限定断层的最新活动性。基于这一原因,该时限也被采纳到美国的“第四纪断层与褶皱编图和空间数据库”中第四纪断层最新活动时代分类方案中。(3)由于晚更新世末至全新世这一时段跨度太短而不足以覆盖盆岭区许多断裂上 $M \geq 6.5$ 地震活动的平均复发间隔,

而晚第四纪(≤ 130 ka)代表桑加蒙间冰期(Sangamon interglacial period)(对应深海氧同位素阶段 5(MIS5)),即末次间冰期出现以来的时段,在盆岭区除了一个之外的其它所有已知的曾造成地表破裂的地震都出现在具有晚第四纪活动证据的断层上。所以,正是因为盆岭区大多数的可引发地表破裂的大地震都出现在晚第四纪活断层上,而所有这样的地震几乎确定会发生在第四纪断层上,因此,确定了这两类活断层,也就基本圈定了可引发地表断层作用或强震活动的危险源。

2 活断层相关概念和术语

除了“活断层术语”本身,不同机构、部门和研究者,根据区域构造特点和各自需要,在活断层术语基础上,还提出了许多与之含义相近或属于其特殊类型的概念或术语,其中常见或常用的包括如下。

2.1 新构造(Neotectonics)与新构造断层(Neotectonic fault)

“新构造”术语最早在 1948 年由前苏联 V.奥勃鲁契夫(Obruchev)引进到地质学和地貌学中,用于指“新近纪末到第四纪前半期地球上最年轻的地壳运动”(Embleton, 1987; Pavlides, 1989; 程绍平和杨桂枝, 2008)。但“Neotectonics”一词源于希腊语,词面本身的含义是“地质上年轻的、最近或正在进行的地壳构造和过程”(Caputo and Helly, 2008)。虽然新构造最简单常见的定义是“新近纪以来的地壳运动与变形”(Yeats et al., 1997)。但一直到 20 世纪 80 年代,其定义并不统一,争议也常集中在时间尺度上。国际第四纪研究联合会(INQUA)的新构造委员会曾将新构造限定为“相对现今大地参考面的任何地球运动,它们的机制与地质成因,以及对于各种应用目的意义和未来的扩展等”(Mörner and Adams, 1989)。而在 1984 年 12 月,由英国布里斯托尔(Bristol)大学的 Hancock 教授和卡迪夫(Cardiff)大学的 Williams 教授共同召集的“新构造会议”上,与会专家学者围绕新构造定义及研究进展进行深入研讨后,提出了得到多数学者广泛认同的观点(Caputo and Helly, 2008)。建议将新构造定义为“现今构造应力场及构造地貌格局形成以来所发生的构造运动”,并指出新构造运动出现的关键标志是现今板块边界与运动学图像的建立以及现代构造应力场的形成(Hancock and Williams, 1986; Hancock et al., 1988)。因此,新构造的研究内容包括了最新变形出现的时间、机制和发育演化过程等,但关键是将其从以前的构造阶段区分出来,包括观察新出现的断裂构造和老构造的重新复活等。

根据新的定义,新构造时限是随着不同构造背景下现今应力场形成或出现的时间差异而变化的,这样显然更符合地质事实。如意大利中部亚平宁地区的现今构造应力场被认为出现于距今约 70 万年以来,因此新构造被定义为距今 70 万年以来的构造活动(Tondi, 1998)。在美国,板块边界带上加州地区的新构造时限是距今约 50 万年以来,而西部盆岭区是距今约 2 Ma,但在处于板内构造环境下的北美地区,新构造的时限可定为约 15 Ma(Machette, 2000)。据此,机械使用早期定义的做法就显得不合时宜,如美国地质学词汇所采用的定义“中新世之后的地壳构造与构造历史”(Klaus et al., 2011)。因为在构造应力场发生过显著转变的地区,许多形成于几百万年前,尤其是中新世晚期至上新世的构造,现今可能已经不再活动(Yeats et al., 1997)。但美国的 Wallace 认为,人类社会对过去曾经活动,但未来不再活动的断裂或构造显然是不关心的,据此从实用性角度提出用“活动构造”来完全替代“新构造”术语,并将活动构造定义为“在人类社会关注的未来时段内仍可能活动的构造”(Wallace, 1986)。但由于新构造更重视从长时间尺度来认识构造的现今活动性、形成与演化过程及其成因机制,也更为关注百万年甚至更长时间尺度的构造活动历史(图 1),这对于全面认识活动构造的出现和发展过程具有重要意义,因此在全面认识地球最新构造运动过程方面仍具有不可替代的作用。

“新构造断层”是随着近年来对全球不同地球动力学背景下断层活动的显著差异性,尤其是来自稳定大陆区(Stable Continental Regions(SCR))的活断层研究,导致对断裂活动性和地震复发特征等有了更深入认识后提出来的,并获得了越来越多的认可。美国地质调查局的 Machette(2000)认为,与新构造的定义相对应,可将其定义为“在现今构造应力场作用下形成的,可导致地震活动和地表变形的断裂”,并强调它最新活动的时间上限是现今,但活动时间下限是可变的,对应了上述的不同区域现今构造应力场的形成时间。这意味着,如同新构造的时限一样,新构造断层所注重的断裂活动时限也是因不同地球动力学背景下现代构造应力场建立的时间不同而变化的,有的地区可达 5~10 Ma,而有的可以是 0.5 Ma(Caputo and Helly, 2008; Clark et al., 2012)。这种活动时限的可变性,使得新构造断层能够适用于包括板间、板内和稳定大陆区等现今构造变形强度明显不同的构造区,因此更适用于囊括了多个不同地震活动背景地区的地震危险性研究(Machette, 2000)。从含义上,新构造断层可包含能

动断层和潜在活动断层(相当于在现今构造应力场作用下具有潜在活动性的断裂)(具体定义见后述),但如果严格按照目前一些有具体时限的活断层定义,它可能仅一部分可归为“活动的”。Clark et al.(2012)在研究澳大利亚板块内部相对稳定区的断层活动性时,采用了与 Machette 类似的观点,认为在缓慢变形区,如果仅根据断层上过去地震的重复发生间隔为断层贴上“活动/不活动”的标签,对于判定断层未来发震潜能是不科学的,研究属于稳定大陆区(Stable continental region (SCR))的澳大利亚的断层长期活动行为,更适合采用“新构造断层”术语,并将澳大利亚地区的“新构造断层”定义为“在澳大利亚现今地壳应力作用下可以发生位错,并且未来仍可能再次活动的断裂”(Clark et al., 2012)。全球地震模型组织(GEM)于 2010 年启动的“GEM 断裂的地球计划”(the GEM Faulted Earthquake (GFE) project)也将“新构造断层”作为全球主要的地震发生源,提出建设“全球新构造断层与褶皱数据库”作为全球地震危险性评价和地震风险评估基础数据库的重要目标。该数据库采纳的定义是“在现今构造机制作用下一直活动的断裂”,强调其活动时限可根据地区不同而变化,在缓慢变形区,可用更长的活动时限来限定断裂活动特性(Litchfield et al., 2013a; Christophersen et al., 2015)。

由上可知,新构造与活动构造两者所强调的侧重点和研究内容都有所不同,活动构造虽然也强调构造的最新活动性,但更侧重于对构造未来活动的可能性及其潜力的研究,而新构造关注的研究领域更宽且时间尺度更长,更强调对现今构造应力场形成演化过程和活动构造发育历史及其动力学机制的研究(吴中海, 2018)。而新构造断层的提出则明显拓宽了活断层的范围,适用区域与领域也更广,尤其是针对跨不同动力学背景或包含多种不同构造环境的大区域范围。因此,新构造弥补了活动构造时间尺度相对较短的不足,具有更广的适用范围,这是“新构造”术语能一直沿用至今并再次焕发活力的重要原因。

2.2 能动断层(Capable Fault)与能动构造源(Capable Tectonic Source)

能动断层与能动构造源是常见于核电站或核废料处置选址等对场址稳定性要求很高的活断层危险性评价相关规范标准中的术语。美国原子能委员会(US AEC)1973 年发表的“核电站地震与地质选址标准”中首先使用了“能动断层”概念(US Atomic Energy Commission, 1973),并被国际原子能机构(IAEA)采用。其最初定义是“中更新世以来(主要是

距今 500 ka 以来)有过多次活动且未来仍有潜在活动性的断裂或构造”(US NRC, 1997, 2007; 李起彤, 1991),主要鉴定标准如下。

(1)在过去 35 000 年(35 ka)内接近地表至少活动过一次或在距今 50 万年(0.5 Ma)内活动过多次的断层,之所以将断裂活动时间界限确定为 35 ka 和 0.5 Ma,是因为可使用当时的绝对测年方法 ^{14}C 和 K-Ar 定量限定该时段地质样品;

(2)沿断层存在仪器记录到小震活动及宏观地震活动,或发生过多次历史地震事件,并能证明地震与断层活动有关;

(3)过去活动过,将来仍有可能再活动,或该断层与另一已知的能动断层存在构造联系,当另一能动断层活动时,可引起该断层出现地表或近地表活动。

近年来,美国核管会基于“能动断层和褶皱”等可统称“能动构造源”,在更新的有关规范标准中,用含义更广的“能动构造源”替代了“能动断层”,但定义和鉴定标准与后者具有相似性。基本定义是“在现今地震构造背景下能够导致震动式地面运动和地表构造变形,包括断裂和褶皱作用的构造”(US NRC, 1997, 2007),并且至少包括以下 3 个特征之一。

(1)在最近 50 万年来,在地表或近地表多次重复活动导致地貌或地质变形,或最近约 5 万年来至少发生过一次构造变形。

(2)与一个或多个中等至大地震,或通常伴随着明显地表变形的持续地震活动性之间存在合理的相关性。

(3)一个与具有上述两个特征之一的能动构造源具有密切构造关系的构造,当能动构造源发生变形或运动时,可以合理推断该构造也会随之发生运动。

国际原子能委员会(IAEA)则一直沿用了“能动断层”术语,但定义和判定标准也在不断更新(IAEA, 1991, 2003, 2015)。最新规范中的定义是“具有能在地表或近地表产生位移的明显潜能的断层”,并特别指出能动断层不完全等同于活断层,而只是活断层中可产生明显的地表或近地表永久变形的断层,这里的变形主要指可造成近场区和场址区出现地面错位或变形的工程灾害,包括地震断层引起的地表破裂、盲断层引起的地表沉降或隆起以及断层蠕滑等(IAEA, 2010, 2015)。该规范认为,基于地质的、地球物理的、大地测量的或地震地质的等资料,当断层满足以下一个或多个条件时,可判定为能动断层(IAEA, 2003)。

(1)在过去一个时段曾重复运动或变形,并可据此合理推断其在未来仍将在地表或近地表造成变形的断层。在强活动区(如不同板块之间或板块边界

带),当地质和地震数据一致揭示断层具有短的地震重复间隔时,评价能动断层过去活动的时段应主要是万年尺度,尤其是晚更新世至全新世;而在弱活动区(如板内构造环境和相对稳定的大陆区),则需要评价更长的时段,采用百万年尺度的上新世至第四纪比较合适(IAEA, 2010)。

(2)一个断层被证实与已知的能动断层存在密切关系,其中一个断层的运动可引起另一个在地表或近地表发生运动或变形。

(3)一个发震或控震构造可以被合理地推断其在场址区的现今地球动力环境下可发生的潜在最大地震足以造成地表或近地表运动或变形。

正如前述的新构造定义所强调的,新的“能动断层”判定准则也指出,不应该对能动断层的最新活动时间限定一个先天的、固定的“时间窗”,因为不同构造环境下的断层变形强度和活动周期都可能会显著不同,“时间窗”的确定实际上依赖于场地所处的构造环境或地球动力学背景(IAEA, 2015)。也就是说能动断裂的时限也应该是可变的。如:板块边界带通常以发育强活动断裂为主,而板内构造环境下的断裂活动性差异大,但多以中等活动性为主,而在稳定大陆区则多发育弱活动断裂。因此,IAEA 相关准则中专门提出,对于板块边界环境,“时间窗”可相对较短,建议重点考虑晚更新世至全新世活断层,但在板内构造环境,“时间窗”应扩大至上新世至第四纪(IAEA, 2010)。国内核电厂选址及相关规范基本上是机械照搬了早期的能动断层定义,指“可能引起地表或近地表明显错动的断层”(国家核安全局, 1994; 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和国家标准化管理委员会, 2005a, b)。

2.3 其它相关的活断层术语与定义

除了新构造断层和能动断层外,还常见一些活断层的特殊类型,具体概念或定义如下。

(1)地震断层(Seismic fault):这一术语最早被日本所使用,原意指“历史上伴随大地震活动在地表出现位移或形成同震破裂的断层”(邓起东, 1982; 王东初, 1985)。国内一般被表述为“地震时应变积累的突然释放所形成的地壳破裂或强烈地震导致的地面破裂”(丁国瑜, 1982, 1988),或者“地震时导致地壳破裂或错动而形成的断层,一般是先存断层再次粘滑错动在地表重新形成变形带,或者是在特定应力场作用下因地震活动而形成的新生断裂”(徐锡伟, 2006)。上述表述都强调了地震导致地表产生破裂的断层。但也存在不同的表述,如“1000–2000年来或历史记载有过破坏性地震记录而且被查明全

新世期间存在中强史前地震活动,或有地震直接引起的地壳破裂的断层”(李起彤, 1991; 强祖基等, 1992),这实际上扩大了地震断层的范围。但后来国际上一般把“控制震源分布或构成地震发生源的断层”称为地震断层。为了避免混淆,日本把之前所称的地震断层改称“地表断层”。由于地震断层通常被认为是影响工程场地稳定性的重要因素,因此,该术语也常见于国内的水电和铁路等工程的抗震设计规范中,并针对存在地震断裂的不利或危险场地,提出了相应的工程处理措施(中国水利水电科学研究院, 2000; 中华人民共和国铁道部, 2006)。另外,国内一些规范中还存在与地震断层相似的术语“地震活动断层”(seismo-active fault),被定义为“曾发生和可能发生地震的活动断层”,或“可能发生破坏性地震的断层”,或“曾经发生和可能发生地表破裂型地震的活动断层”(国家地震局, 1998; 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和国家标准化管理委员会, 2005b, 2018)。

(2)发震断层(Seismogenic fault):一般指“空间上控制地震发生且能产生 $M \geq 5.0$ 破坏性地震的,或有历史地震地表破裂的,或存在确切古地震遗迹的活断层”(李起彤, 1991; 徐锡伟, 2006)。全球地震模型(GEM)的新构造断层数据库中将其定义为“可产生中等至大地震的断层”(Christophersen et al., 2015)。从定义上可知,它与地震断层可以看作是近义词。发震断层这一术语在国内各类标准规范中也应用较多。如在我国的岩土工程勘察规范中(中华人民共和国建设部, 2009),将其定义为“近期(近 500 年期间)发生过 $M \geq 5.0$ 地震的断裂,或者今后 100 年内可能发生 $M \geq 5.0$ 地震的断裂”,这一定义也被采纳于 2007 年出版的《工程地质手册》(常士骧和张苏民, 2007)。另外,在《建筑抗震设计规范》中(中华人民共和国住房和城乡建设部和国家质量监督检验检疫总局, 2010),还包含了关于“场地内存在发震断裂时应对断裂的工程影响进行评价”的内容,专门规定场地内的建筑应避开具有全新世活动性的发震断层主断裂带,且不得跨越断层线,并且在甲类建筑的设计阶段,还需要对场地区的发展震断裂开展专门研究,而对于乙类和丙类建筑,8 度烈度区中对发震断裂的最小避让距离分别为 200 m 和 100 m,在 9 度烈度区应提高到 400 m 和 200 m。

(3)震源断层(Seismic-source fault):指构成震源或在震源区引发地震的断层,而震源断层出露地表的部分即是所谓的地震断层或同震地表破裂。现在一般把震源断层和早期所称的地震断层统称为“地震断层”。

(4)潜在活断层(Potential active fault): 该术语常见于美国加州的活断层避让法案和美国核协会(ANS)制定的有关地震危险性和地表破裂或变形评价等的标准规范中(Bryant and Hart, 2007; ANS, 2008, 2010), 系指“第四纪期间(美国指距今约1.6 Ma 以来)发生过地表位错或变形, 但缺乏全新世活动确切证据的断层”(Bryant and Hart, 2007)。在美国用于核电站选址的地震危险性评价标准中, 比较重视对潜在活断层及其未来活动危险性的调查评价, 规定必须客观评价其最新活动时间与活动速率, 并了解其第三纪至第四纪的演化以及现今构造应力环境的关系等(ANS, 2010)。

(5)全新活动断层(New active fault): 这是国内岩土工程勘察规范中采用的术语, 并被列入《工程地质手册》, 指“在近代地质时期内(距今10 ka)有过较强烈地震活动或近期正在活动, 在将来(今后100年)可能继续活动的断裂”(常士骝和张苏民, 2007; 中华人民共和国建设部, 2009), 这实际上类似于全新世活断层, 并且也被用于如《建设用地地质灾害危险性评估技术要求》等一些行业标准中(中华人民共和国国土资源部, 2004)。

(6)预警断层(Warning fault): 这是最初由日本地震地质学家松田时彦在分析日本岛的活断层未来强震危险性时提出的概念, 用来指示未来潜在强震危险性较高的活断层(Matsuda, 1977)。它主要有以下两条判别准则(强祖基等, 1992)。

①离逝时间准则: 由于活断层上大地震(一般指可以起地表破裂的地震)的发生具有重复性和一定的准周期性特点, 一条断裂上最近一次大地震的离逝时间越长则距离其未来发生强震的可能性就越大或危险性越高。离逝时间是指活断层距上一次该断裂发生大地震的时间间隔, 即一条活动断裂的离逝时间越接近其大地震复发周期, 它未来的强震危险性便越高, 当离逝时间接近或超过其大地震的平均复发周期时, 便可称为“预警断层”。这一准则也可引申到由多条断裂带组合而成的大规模活动构造带或构造体系上, 如果已知一条活动构造带上最近的大震活动具有准周期特征, 则当其平静阶段持续时间越长, 便越接近下一个活跃期, 该构造带或断裂带未来发生大震的危险性会越高(吴中海等, 2014a)。

②强震的连锁反应或触发作用规律: 在同一断裂带的不同段落或构造体系中的不同断裂之间, 强震活动常会出现连锁反应或触发作用。因此, 对于包含了多个不同段落的断裂带或由多个活动断裂带构成的活动构造体系, 当其中的某个段落或断裂发生大震之后, 与其在运动学或动力学等方面存在密

切联系的其它段落或断裂发生大震的危险性将会随之增高, 从而成为“预警断层”。如华北地区1966年发生邢台6.8和7.2级地震后, 顺北东向控震构造带接连发生了1969年的渤海7.4级地震和1975年的海城7.3级地震, 随后又在相邻构造带上发生了1976年唐山7.8级大地震(强祖基等, 1992), 这显然是构造体系中不同断裂间相互触发作用的典型实例。

松田时彦提出的预警断层一直是地震长期预报的一种有效手段, 尤其是其中的离逝时间准则对于识别活动断裂带上的地震空区具有重要参考(吴中海和赵根模, 2013; 吴中海等, 2014b)。因此, 有效识别预警断层一直是地震预报预测工作的重要内容。

(7)危险断层(Hazardous fault): 这是美国西部一些地州制定的活断层地表破裂灾害危险性评价指南中, 用于指导工程和建筑物避让活断层, 或指导地方制定相关法律法规时采用的术语。如在犹他州的活断层地表破裂危险性评价指南中(Lund et al., 2016), 专门提出了建筑物应避让危险活断层的问题。该指南中的危险活断层特指“经调查评价后认为需要避让的活断层”, 即那些最新地表断层作用的年龄已经接近或超过断层地质历史上重复发生地表断层作用平均间隔的活断层, 这类似于松田时彦所提出的预警断层。由于它们是未来活动危险性最大的断裂, 因此, 在美国加州和犹他州等地, 都制定了要求新建的人居建筑有效避让危险活断层的法律法规。

(8)盲断层(Blind fault): 属于活断层中的一种特殊类型, 指隐伏于地表之下, 虽然不直接造成地表破裂, 但可造成地表变形的断裂, 通常构成了挤压缩短变形机制下所形成的逆冲-褶皱构造系统中的一部分, 也就是活动褶皱下部经常存在的盲逆断层(ANS, 2008, 2010)。如2013年的芦山M7.0地震和2015年的新疆皮山M6.5地震, 都被认为是典型的盲断层活动结果(徐锡伟等, 2013; Lu et al., 2016)。在GEM的新构造断层数据库中, 则将地表发生的背斜和单斜变形直接作为盲断层存在的地表显示(Christophersen et al., 2015)。

(9)隐伏或埋藏活断层(Buried or concealed active fault): 包括两类, 一类是被第四纪松散沉积物覆盖的, 在地表没有醒目形迹的活动断层(中国地震局, 2005; 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和国家标准化管理委员会, 2005a, 2018); 还有一类是在地表变形后, 变形形迹又被后期沉积物完全覆盖的断层(ANS, 2008)。

3 活断层分类

活断层定义主要是出于活断层识别或鉴定的

需求,而活断层分类是预测活断层未来可能造成的危害及其程度的主要依据,属于活断层危险性评价方面的需求。它最初是在核电站等工程选址时,因涉及如何分类、分级评价断裂活动性,从而采取合理应对措施时提出的。但实际上,城镇规划与建设中也常常面临类似的活断层危险性评价问题。因此,对已知的和新发现的活断层进行合理分类,已经成为科学应对活断层灾害风险的必要前提。

在 20 世纪 70 年代以前,受到活断层认知程度的限制,其分类方案相对比较简单。典型例子有:(1)由阿尔贝(A. L. Albee)和史密斯(J. L. Smith)(1966)指出的(转引自 Slemmons and McKinney, 1977),断层活动性仅反映断层的单一状态,而其活动程度是变化的,至少可区分为强烈、中等和轻微活动 3 类。(2)新西兰地质调查所(1966)(转引自李兴唐, 1991)曾根据活断层在距今 0.5 Ma–50 ka、50–5 ka 和 5 ka 以来,这 3 个不同地质时期的活动频度,将其区分为活动性逐渐降低的 4 类。I 类指“最近 5 ka 来反复活动,或距今 50–5 ka 间反复活动且最近 5 ka 来至少活动过一次的断层”;II 类指“在距今 0.5 Ma–50 ka 间反复活动,或距今 50–5 ka 间活动过一次,并且在最近 5 ka 来也至少活动过一次的断层;或虽然最近 5 ka 来未活动,但距今 50–5 ka 间反复活动的断层”;III 类指“在距今 50–5 ka 期间未活动但最近 5 ka 来活动过一次,或在距今 0.5 Ma–50 ka 期间和 5 ka 以来各活动过一次的断层;或虽然距今 5 ka 以来未活动,但在距今 0.5 Ma–50 ka 间曾反复活动或 50–5 ka 期间活动过一次的断层”;IV 类指“在距今 5 ka 之前未见活动,但 5 ka 以来活动过一次的断层”。另外,松田时彦(1976)提出,根据活断层与地震关系,可将其区分为地震断层和震源断层两类,而根据活动方式不同还可将其分为蠕滑型(蠕滑运动断层)和粘滑型(地震运动断层),前者以持续而缓慢的运动为特征,一般无地震发生或只发生小震事件,而后者主要以突然快速错动为特征(通常变现为强震或大地震),当断层处于闭锁状态时无明显错动发生(表现为缺少强震活动),因此属发震构造(李兴唐, 1991; 强祖基, 1992)。前述的“隐伏活断层”、“地震断层”和“预警断层”等类型,实际上也是根据断层的出露地表情况、是否产生地震地表破裂和未来活动危险性等划分的特殊类型。

20 世纪 70 年代以来,随着活断层调查研究程度不断加深,活断层分类的丰富程度和实用性等都得到不断提升。虽然迄今为止,对活断层分类尚无统一的原则和方案,但常见的是从断裂的活动性、最新活动时代、活动性质和规模等角度进行分类。

其中活动性质的分类与传统构造地质学中的断裂类型划分是一致的,这里不再累述。应用中的常见方案多是基于断裂活动性、活动时代或重复活动间隔等单一指标的分类,或综合性的多指标分类。综合国内外这方面的代表性方案,可将在比较常见且实用性较强的分类方案大致归纳为以下 4 类。

3.1 基于断层活动性的分类方案

断层活动性分类的定性指标是断层在地貌上的显著程度和地质体错动幅度等,主要定量指标是断层滑动速率(Slip rate)、强震活动频率或地震复发间隔(也称“断层重复活动间隔”)。在活断层研究早期,因定量数据较少,更多是依靠定性指标来分类,后期随着定量数据增多,活断层滑动速率和地震复发间隔逐渐成为分类的主要依据。比较典型的方案如下。

3.1.1 以地质-地貌指标为主的分类方案

20 世纪 70 年代,美国和国际原子能管理委员会、美国建设规划咨询会、美国加利福尼亚州采矿和地质协会等机构提出的活断层分类方案可看做这方面的典型代表。

美国原子能管理委员会(US AEC, 1973)根据断层活动性及其表现不同,将断层区分为:活动断层(Active fault)(狭义的)、能动断层(Capable fault)和死断层(Dead fault)3 类。而国际原子能委员会(1972)根据断裂活动速率和地质-地貌的显著度,将其划分为以下 4 个级别(Slemmons and McKinney, 1977)。

A 类:速率为每 1 000 年大于 1 m(高运动速率);

B 类:地形上显示出清晰的断层活动证据;

C 类:地形上的断层活动证据不清晰;

D 类:属于定性上的评价,缺乏足够的断裂活动地质证据与定量数据的支持,这样的断层又被称为能动的地表断层。

美国建设规划咨询会(1973)在重点考虑活断层与地震关系基础上将断层分为危险性逐渐减小的 3 类:活断层、潜在(potentially)活动断层和不活动断层,其中的潜在活动断层又被划分为高潜伏和低潜伏两个亚类(Slemmons and McKinney, 1977)。该方案也被应用于加利福尼亚州早期的地震区划工作中。其具体划分依据如下。

A-活断层(狭义的),指全新世(10 000 年)具有显著运动的断裂构造,特别是历史上出现过地震破裂或地表错动的断裂。

B-潜在活动断层(Potentially active fault),指第四纪(1.6 Ma)具有显著活动和地质上存在强有力的最近活动性证据的断裂构造,但沿断层未曾发现历史的地表破裂或强震发生;该类断层可分为两个亚类:

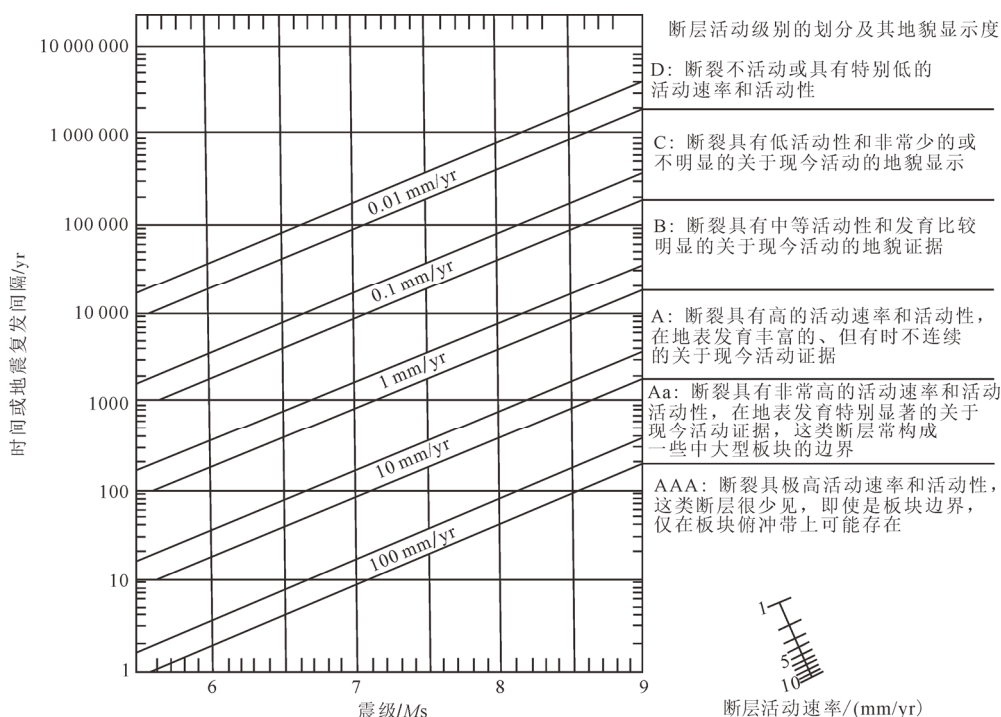


图 2 Slemmons 等总结的活断层的活动性分级方案(引自 Slemmons and Depolo, 1986)
Fig. 2 The classification of active faults with degree of activity (after Slemmons and Depolo, 1986)

表 1 美国 Slemmons 等总结的以断裂滑动速率为主要指标的分类方案表(据 Slemmons and Depolo, 1986)
Table 1 The classification scheme with fault slip-rate as the main index (after Slemmons and Depolo, 1986)

类别	活动性	滑动速率 (S)/(mm/a)	主要表现与特征
AAA	极强	≥ 100	地表表现特别显著且具有极高的断裂活动速率, 主要出现在板块边界上, 特别是俯冲型边界带上
AA	强	100~10	具有非常显著的地表表现和很高的断裂活动速率, 多数出现在板块边界带上, 或活动性强的大型块体边界上
A	中-强	10~1	具有丰富但有时不连续的地表活动迹象和较强的活动速率
B	中等	1~0.1	具有中等发育或局部较好的地表活动标志和中等活动速率
C	弱	0.1~0.01	具有较少的地表活动证据和较低的活动速率和活动性
D	极弱	< 0.01	断裂的地表形迹不易识别, 活动性极低或基本不活动

I 类-高潜伏的, 指存在全新世活动证据的断裂, 具体包括: ①断层错动了全新世沉积物; ②在延伸到全新世地层中的断层上出现地下水异常; ③出现小震沿断层分布现象; ④具有断层地形的强烈地貌表现(如山嘴、山脊和河谷等的错动, 特别是全新世的地形受到明显的断层扰动或限制等)。

II 类-低潜伏的, 与 I 类相类似的断裂活动证据主要出现在更新世, 尤其是第四纪的早期(距今约 1 Ma 之前)。

C-不活动断层(Inactive fault)指没有显示出全新世或洪积期(北半球更新世期间气候相对湿润的时期)的断层错动或活动性, 且第四纪也未曾发生显著活动的断裂构造。

3.1.2 以断裂滑动速率为主要指标的分类方案

日本学者松田时彦最早以断裂的晚第四纪平均滑动速率(S)为主要定量指标对活断层进行分类, 划分了 A、B、C 三级(Matsuda, 1975)。其中, A 类: $S \geq 1$ mm/yr; B 类: 0.1 mm/yr $\leq S < 1$ mm/yr; C 类: $S <$

0.1 mm/yr。日本活断层研究会在 1980 年借鉴了该方案, 但进一步将 A 类分为 AA 和 A 类。其中, AA 类: $S \geq 10$ mm/yr; A 类: 1 mm/yr $\leq S < 10$ mm/yr。

随着活断层研究及认识的不断加深, 美国的斯莱蒙斯(Slemmons)在松田时彦的断层活动性分类方案基础上, 根据断层活动速率的大小与断层上大地震重复活动时间间隔长短(即复发频率)及晚第四纪期间的地表累计位移量大小之间存在的相关性, 综合可直接体现断层活动强度的地表显著程度、平均滑动速率和强震复发频度等多指标, 进一步细化了活断层的活动强度分类方案(Slemmons and Depolo, 1986)。其主要定量指标是断层上强震活动的平均复发间隔和断层的平均滑动速率, 后者一般根据公式 $S=D/T$ 估算(D 为地质、地貌或人工建筑物的总错动量; T 为断错发生的时间(通常用所断错最新地质体的形成时代来近似代表); S 为断层滑动速率)。新的方案将活断层区分为 6 个不同级别(图 2, 表 1)。

这一分类方案迄今为止仍然是应用较广且比

较合理的断裂活动强度分类方案,主要的不足是,它针对的是全球尺度的活断层,没有考虑陆内走滑断层、正断层和逆断层等不同类型活断层的活动速率差异性,而是采用了统一的定量标准对它们进行分类,这在实际应用中会存在对逆断层和正断层的活动性评价级别偏低的问题。因此,在实际应用中,需要充分结合断层类型和区域活动构造特点等进行细化和改进。

3.1.3 基于断裂重复活动间隔的分类方案

断层复发间隔(Fault Recurrence Interval(FRI))指标反映的是活断层发震频率。正如美国 Slemmons 等提出的断层活动性分类方案所示(图 2, 表 1),它与断层滑动速率之间一般存在正相关性,即滑动速率高的断层,强震复发频率便越高,反之亦然,因此这一指标也是断层危险性评价的重要定量指标。

在新西兰环境部制定的用于指导活断层上及其邻侧土地开发利用的活断层指南中,给出了这方面的典型实例。该指南为了突出断层未来活动的危险性,并明确重要性不同的建筑和土地开发规划是否需要避让活断层或能否被允许在活断层影响带中进行土地开发,提出了按照活断层重复产生地表破裂的平均时间间隔进行分类的具体方案(Kerr et al., 2003)。该方案将活断层划分为 6 类(I-VI类)(Kerr et al., 2003; Becker et al., 2005), 分别为: $FRI \leq 2.0 \text{ kyr}$, $2.0 \text{ kyr} < FRI \leq 3.5 \text{ kyr}$, $3.5 \text{ kyr} < FRI \leq 5.0 \text{ kyr}$, $5 \text{ kyr} < FRI \leq 10 \text{ kyr}$, $10 \text{ kyr} < FRI \leq 20 \text{ kyr}$, $20 \text{ kyr} < FRI \leq 125 \text{ kyr}$, 而重复活动间隔大于 125 kyr 的断层在新西兰被认为是非活动断层。

3.1.4 国内工程地质领域所采用的断层活动性分类方案

国内工程地质领域针对工程规划建设中的活断层勘察、测绘和应采取的工程措施等问题,也制定了基于断层活动性的分类方案。如岩土工程勘察规范国家标准根据断层活动时代与发震潜力,将断层区分为全新活动断裂、发震断裂和非全新活动断裂 3 类,前两者的定义见前述,而非全新活动断裂被定义为“一万年以前活动过,但一万年以来没有发生过活动的断裂”(中华人民共和国建设部, 2009)。其认为对工程场地稳定性影响最显著的是全新活动断裂,并依据断裂活动速率和历史地震强度两个主要参数将其划分为以下 3 类(常士骝和张苏民, 2007)。

(1)强烈全新活动断裂:平均运动速率大于 1 mm/yr 、发生过 7 级以上强烈地震的断裂;

(2)中等全新活动断裂:平均运动速率大于 0.1 mm/yr 而小于 1 mm/yr 、发生过 6~7 级强烈地震

的断裂;

(3)微弱全新活动断裂:平均运动速率小于 0.1 mm/yr 、发生过 6 级以下地震的断裂。

该方案的主要问题是分类过于简单,而且所用指标不够科学。如仅划分了强烈、中等和微弱 3 级,也没有区分断层类型,不能很好地区分中国大陆复杂活动构造区域的断裂活动性差异,并且将活断层上的历史地震强度作为与断裂活动性强弱的指标明显是不科学的,因为历史强震活动时间尺度太短,一般只能代表过去近千年到数百年的断层活动状态,不能全面反映断层的真实活动性,而真正反映断层活动强弱的应是强震复发间隔而非强震的震级。同时国内外的许多震例已经表明,中等活动或弱活动性的断裂也会发生 7 级以上强烈地震。

3.2 基于断裂最新活动时代的活断层分类方案

美国西部州地震政策理事会(Western States Seismic Policy Council(WSSPC))提出的关于断裂最新活动时代的分类方案最具代表性,并被用于犹他州等地方的活断层地表破裂危险性评价指南中(Lund et al., 2016)。其早期的方案将活断层划分为以下 3 类(WSSPC, 1997, 2011; Machette, 2000)。

(1)全新世活断层(Holocene active fault):指全新世期间(距今 10 ka 以来)曾发生过足以引起地表错动的运动。

(2)晚第四纪活断层(Late Quaternary active fault):指在距今 13 万年以来曾发生过足以引起地表错动的运动。

(3)第四纪活断层(Quaternary active fault):指在距今 2.6 Ma 以来曾发生过足以引起地表错动的运动。

随后更新的方案又进行了适当调整,将之前的“全新世活断层”改为“晚更新世末至全新世活断层”,指“晚更新世末至全新世期间(距今 15 ka 以来)曾发生过足以引起地表错动的运动的断层”(WSSPC, 2015)。由于该分类方案中的每个后一类型实际上都包含了前一类型,因此该方案出于保守考虑建议,当应用中缺乏足够证据可证明断裂为第四纪和晚第四纪活断层时,将活断层视为“晚更新世末—全新世活动断裂”。

我国最近公布的《中华人民共和国国家标准:活动断层探测》(GBT 36072-2018)(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和国家标准化管理委员会, 2018),采用了与美国不同的基于断裂最新活动时代的分类方案,将断层划分为以下 4 类。

全新世断层(Holocene fault):全新世期间发生过位移的活动断层。

晚更新世断层(Late Pleistocene fault):断错晚

表 2 法国“REGINE Group”基于地质-地貌与地球物理综合指标的活断层分类方案(据 Blés et al., 1991)
Table 2 The classification scheme of active fault based on geological - geomorphological and geophysical comprehensive indicators summarized by French “REGINE Group” (after Blés et al., 1991)

地表变形 地震活动	地表构造变形形迹的发育情况					无地表构造变形 形迹	活断层类型
	发育有错动已知年龄标志体的地表破裂			不发育地表破裂			
	全新世至 晚更新世	早-中更新 世	第四纪之前	具有多种地 表变形标志	仅有个别地 表变形标志		
具有历史与仪器 记录的地震活动	A1	A2	A3	B	C	D	地震活断层
无历史与仪器地 震记录	a1	a2	a3	b	c	d	无地震记录 的活断层 潜在活断层

更新世地层、地质或地貌单元, 但无全新世活动证据的活断层。

早—中更新世断层(Early and Middle Pleistocene fault): 断错早—中更新世地层、地质或地貌单元, 但无晚更新世以来活动证据的断层。

前第四纪断层(pre-Quaternary fault): 第四纪以来不活动的断层。

实际上, 类似的划分方案在之前的活断层编图中已经开始应用。如: 在邓起东(2007)编制的《中国活动构造图(1:400 万)》中, 根据断裂活动时代不同区分出两类活断层, 即晚更新世—全新世活动断裂和第四纪活动过但晚更新世以来活动情况不清的断裂。在徐锡伟等(2016)编制出版的《中国及邻近地区地震构造图(1:400 万)》中, 采用了与上述活断层探测国标中一致的方案。

这一类型的活断层分类方案对于了解断裂的最新活动状态是有重要参考意义的, 也经常是政府防范活断层灾害风险和定重点防范对象时的重要依据之一。如美国加州地区一般将全新世活断层作为活断层避让的重点对象。但要注意的是, 断裂的最新活动时代本身只反映断层过去的活动状况, 实际上与其活动性之间或潜在地震危险性并无直接关系。虽然强活动性的断层通常都是全新世活断层, 但并不意味着全新世活断层都是强活动性断裂, 而且晚第四纪活断层的未来强震危险性也不一定低于全新世活断层。

3.3 基于综合指标的活断层分类方案

20 世纪 80 年代末, 针对西欧地区核电站等重要工程选址可能面临的活断层危险性, 法国组织多部门的地质学家组成“工程地质与新构造讨论组”(英文简称“REGINE Group”), 专门对活断层的定义与分类进行了研讨。认为美国原子能管理委员会关于活断层的定义和分类方案主要针对和适用的区域是岩石圈板块边界带地质环境, 在应用于主体处于板内构造环境的西欧地区时会存在两个主要问题(Blés et al., 1991): (1)两者的地球动力学环境明显不同; (2)可用于绝对年龄测试的高质量样品通常是

缺乏的。因此, 该讨论组针对性地提出了更适用于板内造山地球动力学背景下西欧地区的活断层定义与分类方案(表 2)(Blés et al., 1991)。该方案所考虑的活断层限定条件比较全面, 分类结果也比较系统, 因此, 对于构造环境类似的其它区域同样具有重要的参考和借鉴意义。

该方案以是否存在地表变形和是否发生地震作为判别断裂活动性的两条根本准则, 前者主要指是否发生过错动已知形成年龄标志物的地表破裂, 后者指是否存在历史与仪器记录的地震。据此将活断层分为 3 类共 12 种(表 2), 主要特征如下。

(1)地震活断层(A-D 类活断层), 主要指发生过历史或仪器记录的地震活动的断层, 根据断层上是否存在地表破裂, 地表破裂形成时代的不同, 以及地表是否具有构造变形形迹, 可进一步区分为“A1-A3、B、C 和 D”共 6 种;

(2)a-c 类活断层, 历史上未发生地震活动的活断层, 根据断层上是否存在地表破裂, 地表破裂形成时代的不同, 以及地表是否具有构造变形形迹, 可进一步区分为“a1-a3、b 和 c”共 5 种;

(3)d 类活断层, 即潜在活动断裂, 特指与已知的地震活断层处于同一构造应力场环境并具有构造关系的断裂, 如空间上呈雁列或共轭分布, 或具有类似的几何形态与空间产状。

该方案强调, 断裂是否发生已知的历史或仪器记录地震, 必须是地震震中位置与断层关系相对明确, 并且其等震线长轴方向、震源机制解和余震分布等能够一致证明地震与相关的断层活动存在成因关系。

3.4 其它分类方案

除了上述比较有代表性的活断层分类方案, 一些学者和机构根据研究目的或应用的需求不同, 还提出了其它一些比较有特点的分类。如丁国瑜(1982)根据断层发育阶段不同, 划分出包括了“死断层”在内的以下 5 类活断层。

幼年期: 指在地壳剪切强度弱或剪切应力最集中部位新形成的, 尚未出现明显位移的微裂隙发育

带或隐性破裂带,常以小震的成带活动表现出来。

生长期:指处于生命力最旺盛阶段的年青活断层,常表现为直线式且有明显位移的断裂构造,其破裂发展的端部或与其它构造交叉的部位常有强震发生。

壮年期(或活跃期):指由多条年青的活断层发展联通而成,发育成熟的断裂带。其不同段落的地震活动性强弱不一,但常有活动段落的迁移转化。

老年期(或衰亡期):指进入衰亡阶段的断层,其活动程度微弱,常被后期的断裂切割支解,地震活动性很低且活动周期长。

化石断层(或死断层):指已固结愈合、完全停止活动的断层,这类断层无地震活动。

不同的活断层发育阶段实际上也大致对应了断裂活动性及其上地震活动性由弱到强,再由强转弱的过程。因此,合理区分断裂的发育阶段对于深入认识断裂的地震危险性具有一定的积极意义。

新西兰环境部的活断层避让指南中,除了前述根据活断层重复活动间隔的分类外,为了更好地确定活断层的避让宽度和采取更有针对性的活断层灾害风险防范措施,还根据断层形迹展布情况将活断层分为 A、B、C 三种类型(Becker et al., 2005)。

A 类:指地表形迹得到很好限定,结构简单,宽度较窄,一般在几米至几十米的断层;

B 类:指地表形迹分散,结构较复杂,常包含多条次一级断层形迹或褶皱,宽度一般可达几十米至几百米的断层,

C 类:地表形迹不确定的断层,原因可能是没有被详细地填图或没有被识别,也可能是因地表作用被侵蚀或覆盖。

上述分类方法都是对常用的或传统的断层分类方案的有益补充,对于断层危险性评价和灾害风险防范等都具有一定参考价值。

4 典型国家和地区采用的活断层定义与分类

这里主要列举世界上一些活断层相对发育且研究程度较高的国家或地区通常采用的活断层定义与分类方案,帮助进一步了解处于不同活动构造地带的国家或地区在这方面的一些特点和经验。

4.1 美国

美国横跨北美大陆,包含多个大地构造环境明显不同的区域,其西北部的阿拉斯加地区和落基山脉以西的西部区处于太平洋板块与北美板块的斜向俯冲碰撞与走滑转换边界带上,而东部属于大西洋西侧的被动大陆边缘。根据所处板块构造部位和现今地壳变形方式不同,美国大陆可区分为阿拉斯

加、加州(或圣安德烈斯断裂系统区)、盆岭区(也称大盆地区,主要包括犹他州、内华达州及加州东南段和亚利桑那州西部等区域)和中-东部地区共 4 个不同的活动构造区(Yeats, 2012)。阿拉斯加在太平洋板块向北美板块发生北西向斜向俯冲作用下,现今地壳以发生强烈的压扭变形为特征,主要发育逆断层和平行俯冲带的大型右旋走滑断层。加州地区处于太平洋与北美板块间的走滑转换边界带上,以发育巨型的北西向圣安德烈斯右旋走滑断裂系统为特征,其中走滑断层的第四纪活动性普遍较强。盆岭区属于板内近东西向伸展作用下的弥散变形区,以发育数百上千条规模相对较小,但普遍具有潜在活动性,地震平均复发间隔在几千年至数万年不等的正断层为特征(Lund, 1998)。而北美大陆中-东部的大部分地区属相对稳定区,普遍是以近东西向至北东向水平挤压构造应力场作用下的古生代至中生代老构造复活为主,活断层不太发育且活动性普遍很弱,地震频度低,以发育稳定大陆型地震为特征(Yeats, 2012)。

美国是世界上活断层研究的重要发源地和引领者,许多国家和地区所使用的活断层定义与分类都会直接借鉴或不同程度地受到美国有关规范标准的影响。但由于美国活动构造类型多,不同区域的活动性差异显著,加上不同学者的认识角度和不同机构的应用目的不同,美国对活断层定义、类型及其使用等也一直存在不同认识,提出过多种不同的定义和类型,而且不同区域和行业所采用的定义与类型也常存在差异,比较有代表性的可概括为以下 4 类。

①强调晚更新世—全新世期间曾经活动的断层,这在处于板块边界带上的加州地区应用最多。典型代表是美国加州在 1971 年 $M_w6.6$ 圣费尔南多(San Fernando)地震后实施的“奥尔奎斯特-普里奥罗特别调查带法案”(the Alquist-Priolo Special Studies Zones Act), 1994 年更名为“地震断层区划法案”(Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning Act), 也简称“AP 法案(Alquist-Priolo Act)”(Bryant, 2010), 是国际上最早以法规形式出现的强制性“活断层地表破裂灾害避让法”,其定义“全新世(约 11 ka 以来)活动过的断层”为活断层(Bryant and Hart, 2007; Bryant, 2010),加州水资源部大坝安全处(Division of Safety of Dams(DSOD))制定的“断层活动性指南”(DSOD Fault Activity Guidelines)建议的活断层定义是“距今 35 ka 以来发生过地表错动的断层”,并同时给出了“附有条件的活断层”和“不活动断层”等术语及其含义(Fraser, 2001)。

②强调中更新世以来曾经活动的“能动断层”。

这常用于对地质安全性要求更好的核设施选址与建设规范中。如美国核管会曾长期采用的“能动断层”术语,用于指“过去 0.5 Ma 以来多次活动,距今 50 ka 以来至少活动过一次的断层”(US NRC, 1997)。

③认为采用单一时限的活断层定义不全面,须对第四纪期间的活断层进行分类。美国西部州地震政策委员会针对美国西部盆岭区的活动构造特点提出,活断层需要包括“未来具有发生 $M \geq 6.5$ 地震潜能(或可导致地表破裂)的断层”,而该区断层活动性差异显著且重复活动间隔普遍较长的特点决定了不适合采用单一的时限来定义活断层,因此,建议在相关的立法和标准与指南中,可根据断层最新活动时间将其区分为 3 类:全新世(距今约 10 ka 以来)活断层(现改为“晚更新世末至全新世(距今约 15 ka 以来)活断层”),晚第四纪(距今约 130 ka 以来)活断层和第四纪(早期指距今约 1.6 Ma 以来,现指距今约 2.6 Ma 以来)活断层(WSSPC, 2015),该定义被内华达州、犹他州及其首府盐湖城等采纳到地方制定的活断层潜在地表破裂灾害评估指南中(NESC, 1998; Batatian, 2002; Christenson et al., 2003)。

④认为在全国范围适合采用第四纪活断层定义。美国地质调查局(USGS)2004 年公布的“美国第四纪断层与褶皱空间数据库”,将第四纪断层和褶皱确定为可产生 $M > 6.0$ 地震的潜在发震源,采用的定义是“第四纪期间(距今约 1.6 Ma 以来)曾发生过且未来仍会发生大强度地震($M > 6.0$ 地震)或可导致地表变形的发震断层”(Haller et al., 2004)。据此在全国范围内共梳理出近 2000 条已知的和推测的活断层。

美国的 Wallace 强调,活断层应重点关注未来的活动的可能性,可定义为“在人类所关心的未来一段时间内可能发生活动或位错的断裂”(Wallace, 1981)。因为从应用角度,活断层最关注的是断裂未来活动的可能性或危险性,了解其过去及现今活动性的目的实际上是为了判断其在不久的将来是否会重新或继续活动。因此,活断层的活动时间下限应该是开放的而不应该限定统一值,而应根据工程实际需要和社会所关注问题等所涉及的时间长短来确定重点的研究时段(Wallace, 1986; Möner and Adams, 1989)。按此观点,如工程设计寿命期为一百年,那么可将“在未来一百年内可能发生活动的断裂”定义为活动断裂;如果某一地区这一类的断裂主要是晚第四纪期间出现过活动的断裂,则可将活断层定义为“晚第四纪期间有过活动,未来一百年内仍有可能活动的断裂”。因此,无论是出于研究目的还是应用需要,活断层的定义都应该是在综合考

虑研究区的构造背景、地质上的可操作性和研究应用的需要等多因素后的结果,简单套用已有的定义或在缺乏依据的前提下限定活断层的时间下限都是不科学的,并可能造成在应用中导致难以预计的错误结果或混乱。上述理念已经被后人逐渐应用到活动断层的研究与应用的各个方面。如:美国新版“地质学词汇”中所采用的活断层定义:“最近曾经活动且未来仍可能活动的断层”(Klaus et al., 2011)。美国地质调查局(USGS)公布的地震术语表所采用的活断层定义是“未来某时可能产生地震活动的断层,尤其是那些在过去 10 ka 活动过一次或多次的断层”(USGS, 2019),该定义也被维基百科(Wikipedia, 2018)采用。

另外,美国一些地方结合其部门需要还提出了认为适用于其工程安全性评价的活断层定义与分类。如加州水资源部大坝安全处地质部门制定的“断层活动性指南”,建议在开展与大坝安全性相关的确定性地震危险性评估工作时,可按断层活动性分为 3 类(Fraser, 2001)。

①活断层(又称“活动地震源”),定义为“距今 35 ka 以来发生过地表错动的断层”,根据断层错动的最新时代地层还可区分为全新世活断层和晚更新世活断层,这类断层是大坝设计和重新评估安全性时必须重点考虑和防范的对象。

②附有条件的活断层,也称“附有条件的地震源”,系指“第四纪(距今约 1.6 Ma 以来)发生过地表错动,但距今 35 ka 以来的断层活动历史不清楚的断层”,可进一步区分为第四纪活断层和前第四纪断层(指第四纪期间虽没有发生错动,但在当前构造应力场作用下有可能重新活动的断层)。对于此类断层,在大坝设计和重新评估安全性时需处理并作为“地震源”进行设防。

③不活动断层,是指“具有确切证据证明被时代老于 35 ka 的沉积物所覆盖的和第四纪期间未显示活动性的断层,但区域内缺乏第四纪沉积盖层时除外”,此类断层在大坝设计和安全评估时可不予考虑。

该指南选择 35 ka 作为活断层时限标准主要基于两点(Fraser, 2001): ①因全新世活断层的时限(距今 10 ka)太短,不足以完全排除可对于大坝稳定型造成影响的活断层; ②断层的重复活动间隔可从几十年到几十万年,如果一条断层自距今 35 ka 以来不活动,则表明其重复活动间隔应该大于 35 ka,如此低的活动性对于大坝设计目的而言是可以忽略的。

4.2 日本

日本是西太平洋俯冲边界邻侧岛弧带上的岛

国,也是西太平洋板块、菲律宾海板块、鄂霍茨克-北美板块和欧亚板块东部阿穆尔次板块共4个规模与级别不同的洋-陆板块的俯冲拼贴部位。复杂的板块构造环境造就了其以挤压缩短变形为主兼有走滑作用的压扭构造环境,以广泛发育逆断层和走滑断层为主,具有典型的多断层与多地震特征,是世界上地震特别活跃和受地震灾害影响特别严重的国家。因此,日本长期以来特别重视活断层调查研究工作,也是世界上活断层研究水平和调查精度都很高的国家。

日本的活断层研究起步早,大体与美国同步,但广泛而系统的活断层调查研究主要始于20世纪60年代。在早期,日本对活断层定义的认识并不统一,有人主张将50万年以来或100万年以来活动的断层判定为活断层(王东初,1985),但由著名地震地质学家松田时彦(Matsuda)和贝塚爽平共同组织创办的由44名研究人员组成的“日本活断层研究组”,采用航片解译为主的方法,结合地表调查,历时5年,于1980年编写完成日本活断层研究史上的划时代成果——《日本活断层——分布图与详细目录》(原图的陆域活断层为1:20万比例尺,海域为1:50万),其中将活断层定义为“第四纪期间(指距今约2.0 Ma以来)持续活动且未来仍有可能活动的断层”(The Research Group for Active Faults of Japan, 1980),这接近第四纪活断层定义。同时指出,采用第四纪作为判定活断层时限准则的主要原因是,日本地区常被用来限定断层最近地质时期活动性的地形地貌主要形成于第四纪期间,并且造成断层活动的现今构造应力场在整个第四纪期间并没有发生大的变化。该定义后来得到了较广泛应用。但也有学者提出(藤田和夫,1981),一些第四纪早期活动的断层,在晚期可能会停止活动,并且未来再次发生活动的可能性也很小,如日本奈良盆地就存在一些形成于约1.1 Ma的断层在约0.2 Ma前停止活动的现象。因此从工程评价角度,将活断层时限限定为2.0 Ma显得过长,据此建议可将第四纪活断层区分为中更新世(特指距今50万年以来)之后不活动的“老活断层”和距今50万年以来仍继续活动的“新活断层”(王东初等,1985)。1991年,日本活断层研究会出版了修订版的《日本的活断层——分布图与说明》(Matsuda and Kinugas, 1991; 彭岩, 1994; 松田时彦, 2000)。其中包含了公开出版的123幅1:20万分幅活断层图和约1800条活断层的详细资料,并附有1:100万日本活断层图和1:300万日本及周边活断层和地震分布图。但新编图件中的活断层基本沿用了早期的第四纪活断层定义。

1995年阪神大地震后,日本地质调查所启动了

新一轮活断层编图计划,进一步基于高精度航片解译分析,并采用新的活断层定义:“晚第四纪或更新世晚期以来(主要指最近几十万年,特别是距今20万年以来)以千年至万年间隔重复活动,而且未来仍有可能活动的断层”,于2000年编制完成基于GIS技术的覆盖整个陆域的1:2.5万数字化活断层详图,并在此基础上新编了1:200万日本列岛活断层图(日本1:200万活断层图编纂组,2000;隈元崇,2000)。新定义的采用排除了相当一部分第四纪早期活动但晚第四纪期间已不再活动的断层,使新编活断层图中的断层数量有效减少,并使得晚第四纪活动性显著的断层更为突出。日本核安全委员会制定的法规指南中,也采用了晚第四纪活断层定义,指“晚更新世(距今约130 ka)以来活动的断层”(NSC, 2006)。2005年,日本产业技术综合所(AIST)下属地质调查部的活断层研究中心完成发布“日本活断层数据库”(Yoshioka and Miyamoto, 2011)。该数据库主要收集梳理了长度大于20 km且滑动速率高于0.1 mm/a的发震断层及其分段行为和相关参数,包含的活断层是“最近地质时期反复活动且在未来可能产生大地震的断层”(Yoshioka and Miyamoto, 2005)。日本2004年和2007年接连发生新潟地震后,考虑到内陆直下型地震的严重危害性,日本的地震调查研究推进总部提出,从2009年启动“活断层”填图工程,用10年时间对之前主要通过航片确认的约2000条活断层进行详查,掌握它们的准确位置与展布,绘制更详实的“活断层基本图”,目的是让民众了解居住地与活断层的距离,提高防灾意识及加强住宅抗震强度(据新华网消息),据悉这一工程目前已基本完成。

另外,除了活断层术语,日本还曾提出“地震断层”术语。该术语最早由日本学者在1935年调查总结台湾地震及其地质成因时提出,系指“伴随大地震活动在地表形成的断层”。统计表明,这样的浅源地震在日本一般是 $M \geq 6.5$ 地震,因此,地震断层也被定义为“历史上伴随 $M \geq 6.5$ 浅源地震出现的地表断层”(日本活断层研究会,1981)。根据定义,日本曾梳理出20余条地震断层,并且调查发现这些地震断层几乎都沿已有的活断层分布,证明地震断层实际上相当于活断层中在历史上因为大地震活动已经发生了地表破裂的断层。后来,地震断层被改称为“地表断层”(王东初等,1985),也相当于现在所称的“地震地表破裂”。

4.3 意大利

意大利因地处非洲板块北部岬角状的亚德里亚微板块与欧亚板块间的俯冲碰撞带,形成了阿尔卑斯南部造山带、亚平宁-卡拉布里亚俯冲弧与弧后

扩张带共 3 个不同构造带交汇联合的复杂构造环境。其境内活断层发育,存在 3 个断层活动方式及整体走向明显不同的构造域,北部是以发育盲逆冲断层和逆断层为特征的阿尔卑斯山东南部和亚平宁半岛中-北段东北侧至波平原区两个挤压变形构造域,中南部是以亚平宁-卡拉布里亚半岛为主体,以发育众多大致平行岛屿走向的正断层及部分走滑断层为特征的伸展变形构造域(Galadini et al., 2001)。复杂的活动构造环境造成意大利是欧洲大陆强震与火山活动都比较突出的国家,因此,该国从 20 世纪 70 年代以来,一直非常重视活断层的调查研究,也是当前欧盟地区活断层调查研究方面的主要引领者。

意大利常用的活断层术语主要借鉴了国际原子能机构(IAEA)关于“能动断层”的定义(IAEA, 1991),通常把活断层等同于能动断层,指“可产生地表错动的活断层”(Galadini et al., 2012)。但对于活断层定义中究竟如何选择活断层时限或限定其发震能力等,也存在多种观点。如意大利卡梅里诺大学的 Cello 等研究意大利亚平宁半岛中部活动构造及其地震危险性时指出,该区在中更新世至全新世期间存在活动的断层都可以被考虑为能动断层和潜在的活断层,具体可定义为“在距今 50~80 ka 以来至少活动一次,能够错动地表或具有发生 $M \geq 6.5$ 地震潜能的断层”(Cello et al., 1997)。

意大利在 20 世纪 90 年代末(1998—1999)成立的“国家防震抗震组”(National Group for the Defense against Earthquakes(GNDT))在实施全国活断层编目项目中,为了系统收集整理已有的具有产生 $M \geq 6.2$ 地震能力的活断层地表证据及资料,确定的活断层标准是“晚更新世末至全新世(主要指末次盛冰期(LGM, 约 24~16 ka BP)以来)存在活动的断层”(Galadini et al., 2001)。并特别指出,选择晚更新世末至全新世作为活断层时限的主要理由是基于以下两方面的考虑。

①认为在这一较短时限内活动的断层必然是与意大利现今的构造机制保持一致的,而第四纪较长时限内活动的构造可能包含与老的和已不活动的构造机制相关的断层。

②比较适合意大利的地质地貌特点,因为影响意大利半岛现今山坡发育的最显著地貌因素是末次盛冰期的冰缘环境,并形成区域上分布广泛的厚层山坡沉积序列,这可构成判定断层最新活动性的重要年代地层标志。

也有学者直接借用国际上前人提出的活断层定义(Machette, 2000),建议将晚第四纪(距今约 125 ka 以来)活动的断层确定为厘定意大利中部活

断层清单的依据(Boncio et al., 2004),但这被认为不符合意大利的地质环境(Galadini et al., 2012)。另有考虑碳十四测年方法对约束断层准确活动时间的限制,在制定地震区划工作指南中,将“距今约 40 ka 以来活动的断层”定义为活断层(Galadini et al., 2012)。

最近, Galadini et al.(2012)结合意大利的活动构造环境及地质地貌特点提出,在工程应用中需要针对不同的活动构造域来选择活断层与能动断层时限。其建议是,在意大利北部以发育盲逆冲断裂与逆断层为主的阿尔卑斯山东南缘与波平原挤压缩短变形域,可采用“第四纪活断层”定义,将第四纪期间(距今约 2.6 Ma 以来)在地貌上和地表浅层显示出活动证据的断层考虑为潜在活断层和能动断层。而在意大利中南部以发育正断层为主兼有走滑断层的亚平宁半岛与卡拉布里亚地区的伸展变形构造域,因为现今构造机制主要出现于中更新世,可将中更新世(距今约 0.8 Ma)以来在地貌上和地表浅层显示出活动证据的断层考虑为潜在活断层和能动断层。但对于上述两个构造域,当断层被时代老于末次盛冰期(LGM, 约 20 ka)的沉积物或地貌体所覆盖时,都可被考虑为不活动,选择 LMG 作为限定断裂不活动的最小时限的主要原因是,该时期的沉积物与地形在意大利是广泛发育的,并且这一时段可包含多个强震复发旋回(Galadini et al., 2012)。

在意大利国内,曾分别由国家地球物理研究所(后改称“国家地球物理与火山研究所”(INGV))和环境保护部两家机构各自负责建设和发布了活断层数据库,并由于应用目的不同而突出了不同类型的活断层。前者负责编制并不断更新的是“独立发震源空间数据库”(The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS)),因为主要服务于地震危险性分析评价工作(DISS Working Group, 2015),主要包含了通过历史地震活动与古地震等研究发现的具有孕育产生 $M \geq 5.5$ 地震的发震源(或发震断层),以及它们的几何学与运动学特征及三维展布形态等信息。而后者编制的是“意大利能动断层作用灾害”(Italy Hazards from capable faulting(ITHACA))专题空间数据库,主要服务于国土规划利用与工程选址等对活断层相关灾害的防范,强调的是能动断层(Galadini et al., 2001),即可产生地表位移的活断层与潜在活断层及其相关信息,并包含了断层的几何学与运动学特征及活动性分级等内容。

4.4 希腊

希腊处于地中海北侧的巴尔干半岛南部,紧邻欧亚板块与非洲板块北部努比亚次板块间的俯冲碰撞带,是亚德里亚、希腊、安纳托利亚和爱琴海等

多个微板块的拼贴部位,也是现今活动性非常显著的近东西向安纳托利亚大型右旋走滑变形带和呈北西至北东弧形展布的希腊弧俯冲带两大不同构造带的联合作用区域。特殊的构造背景造就了该区3个明显不同的构造变形域,并表现出强烈的弥散变形特点(Yeats, 2012)。其中北部地区主体是安纳托利亚断裂带西端的弥散性走滑-拉张变形区,南部希腊弧与安纳托利亚断裂带间的区域是以发育近平行于希腊弧的正断层为主的拉张变形区,西部毗邻伊奥尼亚海的区域和最南端的希腊弧俯冲带则以发育逆断层为主(Pavlidis et al., 2010; Caputo et al., 2010; Yeats, 2012)。由于希腊地区的活断层发育密度高且活动性普遍较强。因此,它也是欧洲地震频度最高的国家。

希腊亚里士多德大学的 Pavlidis 和意大利费拉拉大学的 Caputo 等在合作实施“希腊发震源数据库”(Greek Database of Seismogenic Sources (GreDaSS))项目过程中,提到梳理发震源常涉及的“发震源”(原文主要指地震断层)、“能动断层”和“活断层”3个术语(Caputo et al., 2012),认为希腊的活断层可区分为地震断层和能动断层两类,相当于已知的发震源和潜在发震源。前者的定义是“历史记录以来发生过破裂的断层”,后者指“在现今构造应力场作用下可产生 $M>5.5$ 中-强地震的断层”,它实际上包括已经成为及未来可能成为地震断层的断层。希腊雅典国家天文台地球动力研究所的 Ganas 等在组织“希腊活断层空间数据库(NOAFaults)”建设时,借鉴美国西部、日本和新西兰等国家地区常用的活断层定义,认为希腊大部分陆域属于板内环境,而板内活断层的大地震重复间隔多数都在几千年至数万年尺度,因此活断层定义中适合采用比全新世更长的时限,建议定义为“显示出距今 125–130 ka 以来存在地质活动证据的断层,或曾错动晚更新世至全新世的沉积物或地貌体的断层”(Ganas et al., 2013)。

关于活断层分类, Pavlidis 等在主持希腊活断层编目时建议,可根据断层已知的最新活动时代与活动性将活断层区分为以下6类(Pavlidis et al., 2007, 2010)。

①地震断层:曾直接导致已知的显著地震活动的断层;

②全新世活断层:在距今 10 ka 以来发生过错动的断层,一般具有相对较高的滑动速率;

③晚第四纪活断层:在距今 40 ka 以来发生过错动的断层,这一时限的选择主要是考虑到 ^{14}C 测年的上限;

④第四纪活断层:距今 2.6 Ma 以来发生过错动,

一般具有较弱至中等的滑动速率;

⑤时代不确定的能动断层:指断层的几何学与运动学特征使其易于在现今构造应力场环境下非常可能重新活动并引起破坏性地震,实际上相当于“新构造断层”;

⑥活动性不确定的断层:主要指可能不活动的断层。

4.5 新西兰

新西兰处于澳大利亚板块与西南太平洋板块间俯冲-碰撞带上,是一个整体呈北东向展布的岛国,构成澳大利亚和西南太平洋之间板块边界的大型北东向右旋走滑断层 Alpine 断裂贯穿了新西兰岛中部,将其分隔为西北和东南两个不同的活动构造区(Yeats, 2012)。其北西侧的大部分活断层集中在北东向的 Taupo 火山裂谷带及其周边,而东南侧的断层发育更为广泛,表现为以逆断层和走滑断层为主的压扭变形特征。由于活动强烈的板块边界构造环境,新西兰是典型的多地震国家,也是世界上最早在地震后对走滑断层作用进行专业考察描述的国家。

新西兰国内采用了相对统一的活断层定义(Eileen, 2006)。在新西兰环境部委托“核科学有限责任公司(Nuclear Science Limited(GNS Science))”的地质研究所制定的用于规范活断层及其邻近区域土地利用的“活断层指南”和 GNS Science 最新公布的 1:25 万精度新西兰活断层数据库(NZAFD250)中,所采用的活断层定义都是指:“距今 120–128 ka 以来发生过地表错动或变形且将来仍可能发生错动的断层”(Kerr et al., 2003; Becker et al., 2005; Langridge and Ries, 2014; Langridge et al., 2014, 2016),这相当于晚第四纪活断层。新西兰选择 120–128 ka 作为判定活断层时限准则的主要原因是,晚第四纪沉积物在新西兰广泛发育,并经常被使用在已出版的地质图件中,因此有助于为判定断层活动性提供较好的时代依据(Langridge et al., 2016)。唯一的例外是新西兰岛北部的 Taupo 火山带,该区的活断层被定义为“距今 25 ka 以来发生过错动的断层”。因为该区年龄在 25 ka 及更年轻的火山和河流沉积物掩盖了更老的沉积和地形,并且最新的活动构造 Taupo 裂谷的形迹也都出现在后期年轻的沉积物中(Langridge et al., 2016)。

4.6 台湾地区

台湾岛处于菲律宾板块与欧亚板块间的俯冲-碰撞带上,是西太平洋岛弧带上活断层特别发育和强震频率很高的区域。以近南北向的台湾纵谷构造带为界,台湾岛的东、西两侧分属菲律宾板块和欧亚板块。GPS 观测结果显示(Sella et al., 2002),在台

湾岛东侧,菲律宾板块相对中国华南大陆以平均 92~94 mm/a 的速率向北西运移,并与欧亚板块发生碰撞且俯冲至琉球岛弧之下。而在台湾岛的西侧,欧亚板块向东俯冲至台湾岛弧带之下。因此,台湾岛是调节欧亚板块与菲律宾板块间的近东西向缩短的主要活动变形区。根据 GPS 观测数据,跨整个台湾岛的现今地壳缩短率可达约 60 mm/a,其中三分之二(约 40 mm/a)被台湾纵谷对冲构造带所吸收,剩余的三分之一(约 20 mm/a)主要被台湾岛西部的逆冲-褶皱变形带所吸收(Sella et al., 2002; Shyu et al., 2006)。台湾陆域的活断层梳理结果显示,该区已知的主要活断层是 33 或 38 条(Central Geological Survey, 2010; Shyu et al., 2016),主要分布在 3 个不同的活动构造区域,包括:台湾中央山脉东部的纵谷压扭变形带、雪山-阿里山西侧的褶皱-逆冲变形区和台湾岛北端的伸展变形区,前两者是调节台湾岛弧带近东西向挤压缩短变形的的主要区域,其间的分界断裂是近南北的梨山-屈尺断裂带。总体上看,台湾地区的活断层以逆断层和伴有走滑成分的逆断层为主,其次是走滑断层,仅在作为冲绳海槽西延部分的岛屿北端,发育了少量正断层(Shyu et al., 2005)。

台湾经济部中央地质调查所在 1998 年初步完成对整个台湾岛的活断层的系统梳理、编图和数据库建设,并先后在 2000 年和 2010 年两次对活断层数据进行了更新(Central Geological Survey, 2010)。在对公众开放的活断层数据库网络平台上,中央地质调查所给出的活断层定义是“过去 10 万年以来曾经活动,未来可能再度活动的断层”,这也类似于前述的晚第四纪活断层。同时,其依据断层最新活动时代分出 3 类(Central Geological Survey, 2010)。

(1)第一类活断层,指过去 1 万年内曾活动的断层,相当于全新世活断层。该类断层的主要标志是,断层在距今 1 万年以来曾发生错动,或断层错动了现代建筑物和冲积扇等,或与地震伴生的断层(即地震断层),或地形变监测证实具有现代活动性的断层。

(2)第二类活断层,指过去 10 万—1 万年间曾活动的断层,相当于晚更新世活断层。该类断层的主要标志是,断层在距今 10 万年以来曾发生错动,或断层错动了阶地堆积物或台地堆积层。

(3)第三类活断层,称为“存疑性活断层”,指过去 50 万年以来曾活动,但距今 10 万年内的断层活动性,包括断层的存在性、确切活动时代和未来再次活动的可能性等不能确定的断层,这实际上类似于中更新世活断层。其主要判定标志是,错动第四纪岩层或红土缓起伏面(台湾地区该地貌面的时

代大致对应早更新世晚期至中更新世早期),或地形上呈现出活断层特征,但缺乏可靠的地质资料佐证。

4.7 中国大陆地区的活断层定义与应用

中国地质学家早在上世纪 30—40 年代就已开始注意到活断层的地质地貌现象,但直到新中国成立后,随着经济建设对地震区划与风险评价的迫切需要,才开始逐步开展专门的活断层调查研究。1956 年召开的中国科学院“第一次新构造运动座谈会”上,一些专家在发言中提到了“第三纪末以来,特别是第四纪至今仍存在活动性的‘活动断裂带’、‘新断层’和‘第四纪断层’等概念,并指出它们与区域地震活动之间存在密切成因联系,但当时缺乏明确的活断层定义”(张文佑, 1957; 王曰伦, 1957; 余伯良, 1957)。

1966 年河北邢台 7.2 级地震之后,与地震相关的活断层调查研究逐渐增多,中国的活动断裂研究开始步入从定性到定量的发展过程(丁国瑜等, 1989; 邓起东, 1991)。其中李四光在指导全国地震地质工作过程中,反复强调地震地质工作应重点关注现在正在或仍在活动,主要是第三纪、第四纪以来的活动性断裂带、构造和构造体系(李四光, 1977a, b)。国家地震局西南烈度队在 20 世纪 70 年代开展的西南地区地震地质及烈度区划工作中,注意到强震所产生的地震断层常位于中更新以来有活动的断裂带中,因此,将中更新世以来有活动的断裂称为“活动性断裂”(李坪和汪良谋, 1977)。1980 年,中国地震学会地震地质专业委员会召开的“中国活动断裂与古地震学术讨论会”对我国 70 年代的活动断裂研究工作进行了全面的交流总结,期间对活断层定义及其含义进行了较广泛的讨论,并参照国际上的有关研究进展,提出了“活断层”、“活动断裂”和“地震断层”等术语及定义,但当时的认识并不统一,认为活动断裂可定义为“现今仍在活动或现在正在活动的断裂”,或“第四纪至今正在活动和断续活动着的断裂”,或“第四纪乃至新生代以来有所活动的断裂”等(丁国瑜, 1982; 徐煜坚, 1982; 邓起东, 1982)。可以说,在 20 世纪 80 年代之前,国内地震地质领域对活断层的理解与认识很不统一,但一般认为可分为“新生代、新第三纪和第四纪以来活动的”三种类型(邓起东, 1978),并经统计地震与断层的相关度后发现,6 级及以上地震与已知第四纪以来的活断层关系最为密切。

20 世纪 80 年代开始的针对新疆富蕴 8 级地震断裂带、海原断裂带和鄂尔多斯周缘活动断裂带等展开的活断层专题研究与 1:5 万填图等工作,显著推动了我国的活动断裂定量研究水平(邓起东, 2002;

邓起东和闻学泽, 2008), 期间国内对活断层的定义和认识也得到了逐步明确。归纳起来, 目前主要存在 3 类比较有代表性的不同观点。

(1) 强调将新构造期或第四纪作为识别活断层的主要时限, 认为“晚第三纪或上新世晚期(主要指距今 3.4 Ma)以来, 尤其是第四纪至今持续或断续活动, 未来仍具有潜在活动可能性的断层”为活断层(丁国瑜, 1982; 刘光勋等, 1982, 1989; 马杏垣, 1987; 谢广林, 1989; 马廷著等, 1991; 陆仲家和黄培华, 1991; 李志义等, 1991; 马宗晋, 1992; 黄玉昆等, 1996)。

(2) 强调晚第四纪期间的活动性, 赞成将活断层定义为“晚第四纪以来(主要指距今 100–120 ka 以来的时段)有过活动, 现在仍在活动, 并在未来仍有可能活动的断层”(邓起东, 1991; 徐锡伟等, 2002; 邓起东等, 2003; 中国地震局, 2005, 2014), 或“晚更新世, 特别是全新世以来有过位移证据的断裂”(唐荣昌等, 1993)。

(3) 认为不同地区的活断层起始活动时间可能是不一样的, 只要这些断层现在仍在活动就可以归为活断层, 所以, 人为地硬性规定一个统一的活断层时间上限是不科学且不必要的。因此, 提出可将活断层定义为“现在仍在活动, 将来可能还会再活动的断层”(徐煜坚, 1982; 黄培华等, 1982; 李起彤, 1991), 并强调“现在”是地质上考虑的千年时间尺度, 相当于英文中的“Present”(李起彤, 1991)。同时指出, 出于某种特殊需要, 可以为活断层加上与起始活动时间相关的附加语, 如“新生代以来”、“晚第三纪以来”、“第四纪以来”、“晚第四纪”和“全新世”等, 或为了满足各类规范及可操作性制度条款的需求, 对活断层活动的时间上限做出明确规定, 也就是说, 活动断裂的定义在具体应用中可以根据工作性质和要求不同而异(刘光勋等, 1989)。但如果从工程安全评价需要的时间尺度考虑, 活断层的时限不宜太长(徐煜坚, 1982), 可定义为“近 12 ka 以来有过活动的断层, 可称新活动断层(实际上相当于全新世活断层)”(陆仲家和黄培华, 1991), 或“晚更新世以来, 即最近 10 万年, 尤其是 1 万年以来有过活动, 未来也可能活动的断裂”(邓起东, 1991; 邓起东等, 1992)。

另外, 李兴唐在探讨城市区域地壳稳定性评价原则时, 曾提出“工程活动断裂”概念, 指出它的涵义是距今 50 000 年活动过的断层, 在工程运用期内它可能再活动, 并危害工程安全的断裂(李兴唐, 1987)。其给出的“工程活动断裂”判断标准有 3 条: (1) 年龄下限 50 000 年或在此以后活动过; (2) 第四系内的活动断层, 并与深断裂、新生代裂谷或地堑有成因联系; (3) 延续长度大于 30 km 的深断裂、大型断层

或第四系断层。同时建议, 为避免危害工程安全, 城市市区的重要建筑物应避开活动断裂一定距离。

自 2000 年以来, 在由中国地震局主导编写的各类与活断层相关的地方、行业和国家标准与规范中(中国地震局, 2005, 2014; 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和国家标准化管理委员会, 2005a, b; 北京市质量技术监督局, 2012), 包括最新颁布的活动断层探测国家标准(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和国家标准化管理委员会, 2018), 都统一将活断层定义为: “晚第四纪以来有过活动的断层, 包括全新世活动断裂和晚更新世活动断裂”或“距今 12 万年以来有过活动的断层”。但可以注意到, 在工程建设部门的一些规范标准中仍在采用不同的定义, 如岩土工程勘察规范国家标准中使用的“全新活动断裂”(中华人民共和国建设部, 2009)。在新版的《工程地质手册》中(常士骧和张苏民, 2007), 则认为中国第四纪早、中更新世之间存在大范围的构造运动, 其所引起的断裂活动可一直持续至今, 因此, 将活断层定义为“中更新世以来有过活动痕迹的断裂”。

5 活断层编图及空间数据库建设中的活断层分类方案

活断层是地震的直接危险源, 活断层编图及其空间数据库建设是从区域上全面掌握其位置和了解其危险性的重要基础, 并且开展相关工作也是实现活断层数据共享和更好地服务于政府与社会不同领域所必须的。因此, 在活断层相对发育的国家和地区普遍十分重视这项基础性地质工作。日本在 20 世纪 80 年代初最早完成了全国性活断层图的系统编制和出版, 美国、日本、意大利和新西兰等国在本世纪初期还先后完成活断层空间数据库建设, 并面向公众开放。对于活断层编图及空间数据库建设而言, 通常都需要明确活断层定义, 并制定具有可操作性的活断层分类方案(表 3, 4, 5), 因为这是直观表达其活动性与活动时代差异的必要方式, 并可作为使用对象提供重要参考。所以, 这里重点介绍一些代表性国家和组织在开展活断层编图及空间数据库建设过程所采用的比较有代表性的活断层分类方案(表 3, 4, 5), 供相关行业或机构在科学制定和选择活断层分类方案时参考。

5.1 “世界主要活断层编图”项目

“岩石圈科学委员会”(Scientific Committee on the Lithosphere, SCL)(原称“国际科研岩石圈委员会”)在 1990 年启动了国际岩石圈计划中的任务组 II-2 “世界主要活断层编图”项目(the International Lithosphere Programs “Task Group II-2 Project on

表 3 “世界主要活断层编图项目”制定的活断层分类方案
Table 3 The classification scheme of active faults developed by the International Lithosphere Programs
“Task Group II-2 Project on Major Active Faults of the World”

采用区域 分类依据	初始方案		西半球		东半球
	名称	时限			
活动时代	历史活断层 ⁽¹⁾	<200 yr 至 2000 yr	<150 yr		采用
	全新世活断层	<10 ka	晚更新世末—全新世活断层 <15ka ⁽²⁾	晚更新世—全新世活断层	<100 ka
	晚第四纪活断层	<100–130 ka	<130 ka		
	中—晚第四纪活断层 ⁽³⁾	<700–730 ka	<750 ka	中更新世活断层	<0.7–1.0 Ma
	第四纪活断层	<1.6 Ma	<1.6 Ma		未采用
平均滑动速率 (V)	I级断层	$V \geq 5$ mm/yr	$V > 5$ mm/yr		
	II级断层	$1 \text{ mm/yr} < V < 5 \text{ mm/yr}$	$1 \text{ mm/yr} \leq V \leq 5 \text{ mm/yr}$		采用
	III级断层	$V \leq 1 \text{ mm/yr}$	$0.2 \text{ mm/yr} \leq V \leq 1 \text{ mm/yr}$		
	IV级断层 ⁽⁴⁾		$V < 0.2 \text{ mm/yr}$		

注: (1)根据所在各个国家或地区历史记录情况的差异, 时限会有所不同; (2)强调了冰后期以来存在活动的断裂; (3)强调了中更新世以来活动的断裂; (4)西半球区采用的分级。

Active Major Faults of the World”)。东半球(以前苏联和欧洲地区为主)主席——前苏联科学院的地质学家 Trifonov 在主持东半球编图过程中, 建议将活断层定义为“在历史上、全新世(约 10 ka 以来)和晚更新世(过去 100–130 ka)期间存在活动显示的断裂”(Trifonov and Machette, 1993)。而西半球(以美洲地区为主)主席, 美国地质调查局的地质学家 Machette(2000)提出, 定义的活断层时间下限必须至少包含 2~5 个典型的地震复发旋回, 考虑到世界上不同地区的地球动力学背景差异会导致活断层的活动性, 尤其是地震复发间隔的时间长短存在显著差异, 可从几十年到大于十万年, 因此, 不应给活断层设定统一的时间下限, 而应该由各区域根据各自的构造活动特点来确定其活断层定义。

除了提出活断层定义及其原则外, 该项目在设计阶段曾制定了统一的以最新活动时代与滑动速率为指标的活断层分类方案(Trifonov and Machette, 1993; Machette, 2000)(表 3)。建议断层的活动时代划类型可分为 5 类(用不同颜色的断层线加以区分), 而按断裂的平均滑动速率(V)则分为 3 级(用断层线的粗细来区分)(Haller et al., 1993; Trifonov, 1995; Machette, 2000)。但在后期执行过程中, 因受到指导思想差异以及有限定量数据的限制, 东、西半球地区最终采用的方案都在原始方案基础上有所变化。在美国主导的西半球地区, 虽采纳了活断层时代的 5 级分类方案, 但各类断层的活动时限不同(Machette, 2000; Machette et al., 2000), 并且断裂的滑动速率分类被建议扩展为 4 类(V)(表 3), 并指出 I 级断层大多为板块边界带中的断裂, III级和IV级主要以板内断裂为主, 而 II 级断层两者都有(Machette et al., 2000)。但在实际应用中, 因为一些国家和地区的活断层定量数据不足, 有相当一部分

仍采用了原来的 3 级划分方案(Cowan et al., 2000; Lavenue et al., 2000; Eguez et al., 2003)。后来, 上述西半球区的方案也被借鉴应用于美国的全国第四纪断层与褶皱编图和空间数据库建设, 特别是时代划分方案, 在夏威夷岛和犹他州等地方的活断层地表破裂危险性评价指南中都有所体现(Christenson et al., 2003; Cannon et al., 2007)。而在前苏联所在的东半球, 受到断裂活动时代数据不足的限制, 原方案中的 5 类断层时代划分方案被简化为 3 类, 而断裂的滑动速率分类仍采用了最初的 3 级划分方案(Trifonov, 1995)(表 3)。

“世界主要活断层编图”项目总结形成的编图思路和活断层分类方案对后期一些国家或地区的活断层编图起到了很好的参考或指导作用, 如土耳其完成的地震构造数据库参照其中的活动时代分类, 将活断层区分为 4 类: 历史上发生过地震破裂的地震断层、全新世活断层、第四纪活断层和第四纪可能活动的断层或线性构造, 并分层进行了表达(Duman et al., 2016)。

5.2 “GEM Faulted Earth”计划中的“全球新构造断层数据库”

GEM 实施的“GEM Faulted Earth”计划旨在建立覆盖全球的地震危险性评价模型, 其中一项基础工作是联合多个国家或组织来共同建设“全球新构造断层数据库”(表 4)。该数据库建设中基于最能反映断层发震潜能和未来活动危险性的 3 个重要定量指标: 断层的最新活动时代、平均重复活动间隔(或强震复发间隔)和平均滑动速率, 分别制定了详细的活断层分类方案(Litchfield et al., 2013b)。因为该数据库所包含的新构造断层类型多且活动性差异大, 为了更好地区分出不同区域的断裂活动差异性, 其分类方案所划分级别相对较多, 在 3 个分类方案

表 4 世界上主要的国家或地区层面的活断层编图与空间数据库建设现状与所采用的活断层定义情况一览表

国家	数据库名称	发布/最近更新的时间	采用的活断层定义	管理发布部门	单位性质	目的与用途	共享方式	网址
全球地震模型 (Global Earthquake Model) 基金会 (GEM)	全球断层、褶皱和断层源数据库(也称“新构造断层(或活断层)数据库”)	2014	新构造断层	GEM 组织	政府与民间合作组织	确定全球主要地震源, 建立统一的危险性评价体系和地震模型, 服务于全球地震风险的计算模拟	—	https://www.globalquakemodel.org/what/seismic-hazard/active-faults-database/
欧盟	欧洲发震断层数据库 (EDSF)	2011	发震断层 (同 DISS)	意大利国家地球物理与火山研究院(INGV)	公共机构	建立统一的地震危险性评价体系和地震模型	—	http://diss.rm.ingv.it/share-edsf/
美国	美国第四纪断层与褶皱数据库	2004/持续更新	第四纪 (距今 1.6 Ma 以来)活断层	美国地质调查局 (USGS)	公共政府(或联邦)机构	国土空间规划与重大工程选址, 地震危险性评价, 活断层地质灾害防治, 活断层灾害相关的商业保险等	—	http://earthquake.usgs.gov/hazards/qfaults/
日本	日本活断层数据库 (包含断层分段)	2005/2016	晚第四纪 (距今 13 万年以来)活断层	日本高级工业科学技术综合研究所地质调查部(GSI, AIST)	公共机构	地震危险性评价, 国土规划利用与重大工程选址等的地质安全性评价等	—	https://gbank.gsj.jp/activefault/index_e_gmap.html
新西兰	新西兰活断层数据库 (NZAFD250)	2000/2015	晚第四纪 (距今 12.5 万年以来)活断层	国家地质与原子能科学院 (GNS Science Limited)	国有的研究公司	地震地质研究, 基础设施规划, 地震风险模拟, 活断层信息共享等	免费向公众和社会开放共享	New Zealand Active Faults Database [EB/OL]. http://data.gns.cri.nz/af/
意大利	意大利独立发震源数据库(DISS)	2001/2015	发震断层(指可产生 $M_w \geq 5.5$ 地震的断层)	国家地球物理与火山研究院(INGV)	公共机构	地震危险性评价与防震减灾	—	http://diss.rm.ingv.it/diss/
	意大利能动断层灾害数据库	2011	能动断层	国家环境保护与研究学院(ISPRA)	公共政府机构	环境与地震灾害分析, 地貌演化研究, 国土规划与文化遗产保护等	—	http://sgi.isprambiente.it/geoportal/catalog/content/project/ithaca.page
希腊	希腊发震源数据库 (GreDaSS)	2012/2013	能动断层与发震断层(同意大利)	意大利费拉拉大学 希腊亚里士多德大学	国立院校	地震危险性评价, 城镇规划与基础设施建设, 地球动力学与活动构造研究等	—	http://gredass.unife.it/ http://eqgeogr.weebly.com/database-of-active-faults.html
	希腊活断层数据库	2013	晚第四纪 (距今 12.5–13.0 万年以来)活断层	雅典国家天文台 (NOA) 地球动力学研究所	公共机构	地震观测与预测预报, 地质、地震地质和工程地质等研究应用中的活断层制图等	—	http://www.gcin.noa.gr/ (注: 该网站数据库目前被关团)
中国	中国活动构造图及数据库	2007	晚第四纪 (距今 10–12 万年以来)活断层	中国地震局地质研究所	公益性事业单位	活动构造研究, 地震危险性评价和防震减灾等	—	2018 年开始接受网上申请“活动断层数据使用授权”
	中国及邻近地区地震构造图及数据库	2016	活断层	中国地震局	公益性事业单位	支撑中国地震动参数区划及相关图件编制, 提升地震构造成因分析能力等	—	2018 年在地质云 2.0 系统上线
	中国及毗邻邻海活动断裂图及数据库	2017	晚第四纪活断层和可产生 $M > 5.0$ 地震的发震断层	中国地质调查局地质力学研究所	公益性事业单位	国土规划与利用, 重大工程选址的区域地壳稳定性评价, 防震减灾和活断层研究等	—	2018 年在地质云 2.0 系统上线
台湾地区	台湾活动断层分布图与数据库	1998/2015	晚第四纪 (距今 10 万年以来)活断层	台湾经济部中央地质调查所	公共机构	提供社会各界评估参考使用, 服务空间开发的地质安全性评估和土地使用管制等 (注: 活断层调查精度 1:25 000)	免费向公众和社会开放共享	http://fault.moeaegs.gov.tw/MgFault/
俄罗斯西伯利亚	西伯利亚东南部上新世—第四纪活断层数据库	2013	新构造断层	俄罗斯科学院西伯利亚分院	公共机构	支撑区域地震危险性评价, 加深理解现今地壳变形过程	—	—

注: 部分内容引自 Basili et al., 2008。

表 5 GEM 组织的“全球新构造断层数据库”所采用的活断层分类方案
Table 5 The classification scheme of active fault adopted by GEM's "Global Neotectonic Fault Database"

分类依据 分类级别	最新活动时代		平均滑动速率 $V/(mm/yr)$		重复活动间隔 I/kyr
	名称	时限	名称	速率值	
I	历史的与近千年的	0–1000 yr B.P.	非常高 速率的	100–<200 mm/yr	10–<100 yr
II	全新世	1000 yr–11.7 ka B.P.		50–<100 mm/yr	100 yr–<1000 yr
III	晚更新世晚期	11.7 ka–50 ka B.P.		10–<50 mm/yr	1 kyr–<2 kyr
IV	晚更新世早期	50 ka–100 ka B.P.	高速率的	5–<10 mm/yr	2 kyr–<5 kyr
V	早更新世末至晚更新世初	100 ka–1.0 Ma	中等速率的	1–<5 mm/yr	5 kyr–<10 kyr
VI	中新世晚期至早更新世末	1–10 Ma	低速率的	0.1–<1 mm/yr	10 kyr–<100 kyr
VII			非常低速率 的	0.01–<0.1 mm/yr	100 kyr–<500 kyr
VIII				0.001–<0.01 mm/yr	0.5 Ma–<1.0 Ma
IX				—	1 Ma–<10 Ma

中分别包含了 6~9 类不同级别的活断层(表 5)。其中断层的最新活动时代分类包括 6 类, 其中历史活动断层的时限是由不同国家历史记录的时间长短而定的。该分类方案认为从全球尺度, 新构造断层的时限至少应该是 10 Ma。因此, 将其作为新构造断层的最早时限。但同时指出, 这并不属于硬性规定, 当一个地区的新构造断层都形成于 0.5 Ma 以来, 就不需要考虑 0.5 Ma 之前活动的断层了。断层按平均重复活动间隔的长短被区分为 9 类。大致与断层重复活动间隔对应, 假定这一时间间隔近似代表了断层积累 1 m 地表位错所需的时间, 则可估算出相应的断层滑动速率。据此, 相应地将断层按平均滑动速率分为 8 类(I–VIII类)(表 5)。需要注意的是, 断层的最新活动时间、滑动速率与平均重复活动间隔三者之间是存在密切联系的, 如高滑动速率断层的平均重复间隔通常会更短, 最新活动时间距今时段一般也会短。但要注意的是, 由于板内活断层经常存在丛集活动特性, 三者也并非严格的一一对应关系。

上述分类方法及方案后来也被参与 GEM 组织的一些国家借鉴或应用到本国的活断层数据库建设中, 但具体参数常会根据其自身的活断层特点而变化。如在新西兰公布的活断层数据库最新版(NZAFD250)中(Langridge et al., 2014, 2016), 因为其定义的活断层时限是 120~128 ka, 因此断层活动时间分类中只包含了 4 类: 历史的(公元 1840 年以来)、近千年的(公元 1840 年–1000 yr BP)、全新世的(1.0–11.7 ka BP)和晚更新世的(11.7–125 ka BP)。而断层滑动速率(V)分类方案中区分了 5 类, 分别是“非常低速率的: $V \leq 0.2$ mm/a, 低速率的: 0.2 mm/a $< V \leq 1.0$ mm/a, 中等速率的: 1 mm/a $< V \leq 5$ mm/a, 高速率的: 5 mm/a $< V \leq 10$ mm/a, 非常高速率的: $V > 10$ mm/a”。

5.3 美国的“第四纪断层与褶皱数据库建设”工程

为了全面掌握具有潜在灾害风险的活断层分

布及其第四纪活动性, 美国地质调查局在 1993—2003 年期间组织实施了“美国第四纪断层与褶皱数据库建设”工程。该工程强调第四纪是地震断层研究最关键的地质时段, 第四纪断层是 $M > 6.0$ 地震的主要潜在发震构造源, 定义全国范围已知的和已填图的“第四纪断层”系指“地质、地貌及历史地震等证据显示第四纪期间(距今 1.6 Ma 以来)曾经发生大强度的、可产生地表破裂的地震(特指 $M > 6.0$ 地震), 或可成为此类地震潜在震源的断层”, 并采用统一的断层及相关参数的编录格式建设了可更新的、包含地质、地貌和地理等综合信息的已知和推测活断层的空间数据库(Haller et al., 2004; Machette et al., 2005)。2004 年, 包含了近 2000 条活断层及其数据信息的“第四纪断层与褶皱空间数据库”在 USGS 网络平台上发布, 实现向公众免费提供查询服务(表 4)。公众可通过该数据库及时了解所关心区域存在哪些活断层、活断层的分布及空间位置准确性、最近什么时候发生过大地震以及断层滑动方向与速率等信息。

该数据库中主要对断层进行了活动时代和空间位置准确性的分类。断层活动时代分类主要是借鉴了由美国主导的“世界主要活断层编图项目”西半球区的方案(表 3), 将第四纪活断层区分为 6 类: 具体时代不确定的(Unspecified age)、未细分的(Undifferentiated Quaternary (<130 000 years))、中-晚第四纪的(Middle and Late Quaternary (<1.6 million years))、晚第四纪的(Late Quaternary (<130 000 years))、晚更新世末以来的(Latest Quaternary (<15 000 years))和历史的(<150 years), 并在图上用不同的颜色加以区分(U.S. Geological Survey, 2006)。另外, 还将断层的空间位置准确性划分为“很好约束的、中等约束的和推测的”3 类, 在图中采用不同线型, 如实线、虚线和点线加以区分。

5.4 欧洲-地中海地区的发震断层空间数据库

欧盟组织实施“2013年版欧洲地区地震危险性模型”(The 2013 European Seismic Hazard Model (ESHM13))过程中设立了“欧洲地震危险性统一化工程”(Seismic Hazard Harmonization in Europe (SHARE, 2009–2013)), 并专门成立“欧洲活断层与发震源任务组”(European database of active faults and seismogenic sources)来负责编制欧洲-地中海地区的发震断层空间数据库(Euro-Mediterranean Database of Seismogenic Faults (EDSF))及相关图件(Woessner et al., 2015)。在该数据库和相关图件中, 欧洲大陆及邻海被划分为6个不同的地震构造区: 稳定大陆区、洋壳区、活动的浅层地壳区、俯冲带、无俯冲作用的深源地震区和活动火山或地热/岩浆作用区, 并厘定出1128条活断层, 然后采用与GEM“全球新构造断层数据库”相似的方法, 按平均滑动速率区分为7类活断层(Basili et al., 2013; Woessner et al., 2015), 但采用的速率值不同, 由高到低分别是: 10–50 mm/yr, 5–<10 mm/yr, 1–<5 mm/yr, 0.5–<1 mm/yr, 0.1–<0.5 mm/yr, 0.05–<0.1 mm/yr, 0–<0.05 mm/yr。

5.5 日本的活断层编图

日本的活断层研究会(Research Group for Active Faults)在1975–1990年间持续开展了日本陆域活断层梳理与编图工作, 并最早提出根据活断层判定的准确程度和断层活动强度(或称“活动度”, 其关键指标是前述的断层平均滑动速率)进行分类的方案。其中断层的准确度被分为I–III类(The Research Group for Active Faults of Japan, 1980; 王东初, 1985)。

准确度 I: 第四纪活动证据确切的活断层, 此类断层通常根据遥感影像或航片就可较容易地确定;

准确度 II: 推断的活断层, 指可以推断断层运动方向和存在位移, 但缺乏判断第四纪活动性的确切资料或证据;

准确度 III: 可能的活断层, 指因地表显示出比较明显的线性形迹, 而被怀疑可能存在第四纪活动断层, 但不能排除线性构造是否是河海侵蚀或沿断层侵蚀作用形成的地形残迹。

该分类方案强调, 其中准确度II和III的断层是否为活断层需要通过进一步的野外调查和详细研究进行确认。

断层的活动性分类方案包括了5级: AA、A、B、C和D级, 对应的断层滑动速率(S)分别为: 10 mm/a $\leq S$ < 100 mm/a; 1 mm/a $\leq S$ < 10 mm/a; 0.1 mm/a $\leq S$ < 1.0 mm/a、0.01 mm/a $\leq S$ < 0.1 mm/a;

$S \leq 0.01$ mm/a。因为日本陆域没有AA级断层, 而D级虽然可能存在但因活动性太弱而难以识别, 因此, 体现到活断层图中的主要是A、B和C级断层, 其中A和B类被建议为需要重点防范的活断层。

日本1:200万活断层图编纂组在2000年完成的新编“1:200万日本列岛活断层图”基本沿用了早期的分类方法, 但对早期方案进行了适当简化。其中断层准确度只区分了I和II两级, 而断层活动性只划分了3级, A级: $S \geq 1.0$ mm/a; B级: 0.1 mm/a $\leq S$ < 1 mm/a; C级: $S \leq 0.1$ mm/a(日本1:200万活断层图编纂组, 2000)。

5.6 俄罗斯的“西伯利亚东南部地区上新世—第四纪断层数据库”

俄罗斯科学院西伯利亚分院在最近完成的西伯利亚东南部地区(主要包括贝加尔裂谷及邻区)上新世—第四纪断层数据库中(Lunina et al., 2014), 借鉴日本活断层研究组早期的定义(Research Group for Active Faults of Japan, 1992), 将第四纪作为活断层时限, 同时参考美国加州水资源部大坝安全处“断层活动性指南”中定义的“附有条件的活断层”(Fraser, 2001), 将第四纪变形历史比较模糊和当前构造机制下可能活动的前第四纪断裂归为了此类。同时, 该数据库根据断层的最新活动时代将其区分为4类: 上新世活断层、更新世活断层、全新世活断层和历史活断层(指公元1700年至今发生过 $M \geq 5.5$ 地震的断层)。另外, 根据是否具备发生 $M \geq 5.5$ 地震的能力, 还区分了“发震断层”和“非发震断层”。

5.7 中国的活断层编图与分类方案

我国自20世纪70年代后期以来, 处于地震区划、地震地质工作部署和活断层研究等需要, 曾多次编制全国性的活断层图件, 并采用过多种不同的断层分类方案。早期由国家地震局全国地震烈度区划编图组(1978)编制的“1:600万中国主要构造体系新活动和强震震中分布图”(内部用图)主要区分了第四纪活动的断裂和新生代活动的断裂。1979年出版的《中华人民共和国地震构造图(1:400万)》及说明书按照活动性和活动时代差异, 将断层区分为第四纪、晚第三纪及新生代以来的活动断层和新活动不明显的断裂共4类(国家地震局地质研究所, 1979)。1987年出版的《中国及邻近海域岩石圈动力学图(1:400万)》及说明书, 将当时梳理出的500余条晚第三纪以来活动的断层按断层平均滑动速率(R)区分为4级。一级活断层: $R > 10$ mm/a; 二级活断层: 6 mm/a $\leq R \leq 10$ mm/a; 三级活断层: 1 mm/a $\leq R < 6$ mm/a; 四级活断层: $R < 1$ mm/a。2007年出版的《中国活动构造图(1:400万)》(邓起东, 2007),

表 6 新编中国及毗邻海区活动断裂分布图(1:500 万)采用的活断层强度分级方案(据吴中海和周春景, 2018)

Table 6 The classification scheme of active fault with degree of activity developed by the newly compiled Distribution Map of Active Faults in China and Its Adjacent Sea Areas (1:5 000 000)(after WU and ZHOU, 2018)

活动性级别		主要指标					综合特征
编号	名称	地貌上的显示度	变形速率(R)/(mm/yr)			M≥7.0 地震原地复发间隔(T)/(kyr)	
			走滑断层	正断层	逆断层		
AA	极强	特别显著	R>15.0	R>2.0	R>10.0	T≤0.5	断裂构成板块或大型活动地块/断块边界, 规模很大且区域连续性很好, 滑动速率高且强震频率很高
A	强	显著	5≤R<15	0.5≤R<2.0	2≤R<10	0.5<T≤2.5	断裂常构成板内大型活动地块/断块边界, 规模大且区域连续性好, 滑动速率较高且强震频率高
B	中等	较显著	0.5≤R<5.0	0.1≤R<0.5	0.2≤R<2.0	2.5<T≤10	断裂常为板内断层, 部分构成中-大型活动地块/断块边界, 规模中等或较大, 区域连续性较好, 滑动速率及强震发生频率中等
C	弱	一般	R<0.5	R<0.1	R<0.2	10<T	断裂常为活动地块/断块内部断层, 规模通常较小且区域连续性较差, 滑动速率低, 可引发破坏性地震, 但发生强震的频率很低

注: 表中走滑断层、正断层和逆断层的变形速率指标分别采用跨断层的走滑速率、垂直滑动速率和水平缩短速率。强震系指 M≥6.0 地震。

系统地梳理和表达了我国 2005 年以前的主要活断层资料与数据, 识别出约 800 条活断层, 并按历史地震情况及活动时代将活断层区分为 3 大类, 包括: 历史和现代的地震地表破裂带(相当于“历史地震断层”), 晚更新世至全新世(距今 10 万—12 万年以来)活动断裂, 第四纪活动过但晚更新世以来活动情况不清的断裂。最近徐锡伟等(2016)编制出版的中国及邻近地区地震构造图(1:400 万), 按活动时代不同将活断层区分为“早—中更新世断层、晚更新世断层和全新世断层”3 类, 并突出了晚更新世—全新世活动的晚第四纪活断层。

最近, 笔者主持完成的新一代中国活动断裂分布图(1:500 万)(吴中海和周春景, 2018), 考虑到中国大陆不同区域的构造活动性差异显著, 并且动力学背景不同, 包括了在印度板块与欧亚板块碰撞环境下强烈活动的西部构造域, 也包括受到西太平洋板块俯冲显著影响的活动性中等的华北构造区和相对稳定的华南构造区。因此, 编图中主要采用“晚第四纪活断层和第四纪活断层”两类术语。在活动性强烈和中等的中国西部和华北地区, 主要表达的是晚第四纪活断层, 但对于相对稳定的东北和华南地区, 因为断层的活动周期很长, 表达了包括晚第四纪活断层在内的第四纪活断层。但需要强调的是, 其中活断层定义中所称的“活动”, 主要指可产生 M≥5.0 破坏性地震, 或因地震可产生地表破裂或近地表变形的断层作用。同时参考 Slemmons and Depolo(1986)的断层活动强度分类方案, 以断层滑动速率和构造地貌的显著程度为主要指标, 首次尝试按不同断裂类型对活断层进行活动强度分类及图面的分级表达, 区分了极强、强、中等和弱活动性共 4 个级别的活断层(表 6), 结果更直观地显示出了

我国不同区域的断层活动差异特征。

6 讨论

在活断层的定义与分类中, 经常涉及的关键问题集中在断裂的最新活动时代、现今活动性和未来发生活动的潜力或可能性方面, 这也是开展活断层调查及其灾害风险评价或相关的地震危险性评价工作必须回答的问题。其中需首先明确的是: 选择多大的震级和什么时限作为判别断层活动的依据。然后才是最核心的问题, 即如何判定一条断层将来是否还会活动, 以及其危险性如何。

6.1 活断层定义中的地震震级标准

根据前述活断层的定义及其应该具备的基本要素, 断层最新活动的方式应该包括地质、地貌、地震和地形变 4 类。而地震活动无疑是判断断层活动性最直接或最直观的标志, 但在制定或选择活断层定义时, 经常会遇到“究竟具有发生多大震级潜能的断层属于活断层”的问题。很显然, 把所有可以产生地震的断层都定为活动断裂是不合适的, 也是不现实的。因为最应该关注的是可对地表和人类社会造成直接影响或损坏的破坏性地震, 主要指能在地表产生地貌-地质形迹或记录(包括地表破裂、滑坡崩塌、喷砂冒水与砂土液化、地裂与地陷等)或对地貌造成改观的地震(又被称为“地貌地震”(Morphogenic earthquakes))(Caputo and Helly, 2008)。其中可引起地表破坏或产生砂土液化的地震一般是 M≥5.0 浅源地震, 也被称作破坏性地震, 而可产生地震地表破裂的地震至少是 M>6.0 浅源地震(Machette, 2000)。对于“曾造成或可产生 M≥5.0 破坏性地震的断层”就相当于地震断层或发震断层, 而“造成了地震地表破裂或地表位移的断层”则对

应地表断层。据统计,在日本、新西兰和美国盆岭区等,可产生地表破裂的地震一般为 $M \geq 6.5$ 地震(The Research Group for Active Faults of Japan, 1980; dePolo et al., 1994; Langridge and Ries, 2014),这一震级被美国的“西部州地震政策理事会”建议为具有产生地表断层作用能力的地震下限(WSSPC, 1997, 2015),也被犹他州作为判定活断层地表变形危险性的潜在地震下限(Christenson and Bryant, 1998)。但在美国实施的“第四纪断层与褶皱数据库”工程中,主要强调了第四纪断层与褶皱是 $M > 6.0$ 地震的主要发震构造(Haller et al., 2004; Machette et al., 2005)。而在中国大陆内部,一般认为 $M \geq 6.4$ 或 6.8 级浅源地震可产生地表位移(邓起东等, 1992)。因此,在识别和判定可产生地表破裂的地震断层(相当于日本所称的“地表断层”)时,重点是了解和评价断层发生 $M > 6.0$ 或 $M \geq 6.5$ 地震的历史记录及未来发震潜能。

在实际应用中,由于目的不同,加上不同国家或地区的地球动力学背景、断裂活动水平及地震活动特点等方面的差异,在确定应重点关注的断层潜在发震能力下限时,所采用的标准往往会有差异。如意大利国家地球物理与火山研究院编制的“独立发震源空间数据库”,强调了对可引发 $M_w \geq 5.5$ 地震的潜在发震断层和震源区的鉴别和编录(Basili et al., 2008; DISS Working Group, 2015),并且这一标准也被应用于整个欧洲-地中海地区的发震断层数据库(Woessner et al., 2015)。而意大利国家环境保护与研究院(ISPRA)编制的“意大利能动断层作用灾害”空间数据库则强调了具有可产生地表破裂或 $M \geq 6.0$ 地震潜在发震能力的能动断层(ISPRA, 2017)。再如,美国加州 AP 法案的目的是避让未来能够引起明显地表破裂的地表断层作用,加上该区处于太平洋板块与北美板块边界带,全新世强烈活动的走滑断裂带圣安德列斯断裂从该区穿过。因此,该法案定义的活断层是“全新世期间(约 11 ka 以来)发生过地表错动的断层”,但也指出,这一定义并不意味着全新世期间没有地表位错的断层是不活动的(Bryant and Hart, 2007)。

综上,在规范或标准中选择判定断裂活动性的地震震级时,或将地震作为断裂活动标志之一,用于识别和判定发震断层时,需要综合考虑应用的目的和不同地区的灾害风险承受力。如果出于国家或地区防震减灾的需要,须尽可能全面地掌握可发生破坏性地震的活断层,重点了解和评价历史上发生过或未来可能发生 $M \geq 5.0$ 浅源地震的活断层(徐锡伟, 2006)。但此时的活断层鉴别工作量和难度显然

会增加。如果是出于防范可产生地表破裂的潜在活断层风险,如美国犹他州等地州的活断层避让规范或法案,实际上主要针对的是“可引起产生大于 10 cm 地表位移的地震及对建筑物可能造成严重破坏,并且当前工程措施难以处理的活断层”(Lund et al., 2016),因此重点是了解和评价发生过及未来具有发生 $M \geq 6.0$ 或 $M \geq 6.5$ 地震潜能的地表活断层。另外,震级的选取还应考虑一个地区的活断层灾害易损性和对灾害风险承受力的差异,因为相同震级的地震在经济社会发展程度不同的地区所造成的灾害损失会有显著不同,因此对于人口密度大且经济发达区,可适当降低震级,而在人口密度小且经济欠发达地区,可适当提高震级。

6.2 活断层时限的选择

活动断层时限无疑是活断层定义中争论最多的问题。但通过综合对比不同行业规范标准以及不同国家地区所采用的活断层定义及其时限选择的主要因素,可以发现,活断层时限的差异往往与一个区域的构造活动背景或工程建设需要紧密相关。尤其是在工程应用中,定义活断层时限往往需综合考虑区域活动构造背景、断层的重复活动间隔、应用目的、地质上的可操作性以及现有方法的制约等多种因素(Galadini et al., 2012),其中最重要的是区域活动构造背景(包括现今地球动力学环境、地震构造或活动构造域等方面的差异)的影响,因为不同活动构造背景下的现今构造应力场形成时代、断层活动方式和活动水平等都往往存在显著差异。因此,当所处构造区域和应用目的不同时,活断层时限的选择可以不同。例如:对于处于构造活动性强烈的板块边界带上的国家地区,由于区域上主要活动断裂的活动性普遍较强,多数在全新世期间曾多次活动,因此,活断层一般限定被为全新世活动过的断层。而对于构造活动性相对较弱的板内构造环境,由于断裂活动性相对于板块边界明显较弱,一般倾向于将活动断层限定为在晚第四纪期间曾多次活动的断层。从需求角度,对于一般的工程建设而言,由于主要考虑的是未来 100 年工程寿命期内的地质安全性问题,因此,常常更为关注全新世活动断裂,虽然这在板内构造环境下可能是不合适的,因为板内构造背景下的许多断裂重复活动的间隔通常会比较长(常常会超过 1 万年甚至几万年)。而对于核设施建设,由于对安全性的要求极高,对活断层的定义也更为谨慎,一般在核反应堆和核废料库等的选址中,多强调对距今 0.5 Ma 以来曾多次活动的“活断层或能动断层”的鉴定与危险性评估。

对活动断层时限选择的灵活性,已很好地体现

在美国不同机构及相关专家学者对活断层定义的选取或认识上。美国地质调查局地质灾害中心的 Machette 在主持国际岩石圈计划的“世界主要活断层与数据库”项目过程中指出,不同定义与类型的活断层可对应于不同目的和应用范围(Machette, 2000)。在编制服务于地震危险性分析评价的区域性活断层图时,为了使活断层定义与类型的选取可使所表达的活断层能够揭示编图区内地震危险区带的完整程度,在确定活断层定义中的断层活动时限时,需要重点考虑所在区域的地球动力学环境与活动构造背景,以及主要活断层的大地震重复活动的平均间隔。所在区域选择的活断层时限应满足至少可包含区域活断层上 2~5 个地震旋回(即断层上大地震($M \geq 6.5$)重复活动的平均间隔)(Machette, 2000)。如:像美国西海岸地区这样处于强烈活动的板块边界带的区域,由于多数活断层的滑动速率相对较高(0.2~10 mm/a 及以上)且断层重复活动间隔相对短(250~5000 yr),选择全新世活断层就已可以覆盖 2~20 个不等的古地震事件,并可囊括绝大多数活断层。但对于类似美国盆岭地貌区这样的板内构造环境,断裂的活动性相对较弱,并且许多断裂的重复活动间隔一般较长,可达 20~50 ka 或更长(Machette, 2000)。如盆岭区内已知的 17 个历史地震地表破裂带中,16 个出现在晚第四纪活断层上,其中仅 6 个发生全新世活断层上(dePolo and Slemmons, 1997)。因此,全新世活断层术语难以涵盖该区主要的活断层,此时可选择 50~100 ka 作为活断层时限或晚第四纪活断层术语。而在类似澳大利亚与北美大陆中-东部地区的稳定大陆区,古地震研究揭示(Crone et al., 1997),大多的断裂活动具有重复间隔长(>100 kyr)、滑动速率低(<0.01 mm/a)和变形环境以水平挤压应力作用为主等特点。在此构造环境下,晚第四纪活断层和全新世活断层都仅能包含一小部分第四纪期间可能存在活动的断裂,此时采用新构造断层术语是最合适的(Machette, 2000; Clark et al., 2012)。

对于包含了板间(或板块边界)、板内以及稳定大陆区等多个不同活动构造背景区的国家或区域而言(中国和美国大陆就属于这种情况),服务于防灾减灾的活断层调查、数据采集或编图等工作,显然必须考虑板内构造变形区大多数活断层所具有的相对长的重复活动间隔(多数>10 kyr)和短的余震持续时间(一般<100 yr)的特点,而且多数地区有限的历史地震记录不能完全反映第四纪断裂活动性的问题。因此,第四纪活断层和新构造断层是比较合适的选择,如“世界主要活断层与数据库”项目选择第四纪活断层作为活断层编图依据,并允许根据断层的最新活动时代对活断层做进一步分类,从而

可囊括“活动的、能动的和潜在活动的”等不同定义的活断层及类型,进而为地震危险性评价提供更为完整和全面的活断层清单(Machette, 2000)。这一指导思想也被应用于美国的“第四纪断层与褶皱数据库建设”工程(Haller et al., 2004)。而 GEM 在组织建设“全球新构造断层数据库”时,为了能够更全面地覆盖全球范围内不同构造活动区具有潜在发震危险性的活断层,则采用了新构造断层定义(Litchfield et al., 2013b)。

但在全面评价断裂活动性和未来地震危险性时,还需要综合考虑活断层上最近一次大地震发生的时间、受到很好约束的地震复发间隔和可覆盖多个古地震旋回时间尺度上的断层活动速率等重要参数(McCalpin, 2009)。而判断一条特定类型的活断层是否会造成灾害及其风险性,还依赖于社会关注的时间范围和断层上未来地震活动的规模与频率。

6.3 断层的活动性与危险性

断层的活动性,也称活动度(Degree of activity)。活动性不同通常会直接反映在断层的强震复发频率上。活动性强的断层,强震复发间隔可能是几十年至几百年,活动性弱的断层,复发间隔可能在几千年到几万年,而在稳定大陆区,断层重复活动的间隔可能大于十万年,甚至达到百万年(Crone et al., 1997)。另外还有一些断裂的活动性很强,但可能只产生小震。因此,识别活断层更重要的是区分断层活动程度的差异性,而并非划分“活断层”与“非活动断层”这么简单(Yeats et al., 1997)。并且必须注意区分活断层的活动性与危险性,因为两者在应用中经常被混淆,而且涉及到许多规范标准中相关内容的科学性和合理性问题,实际上两者既存在相互联系但又有明显不同(吴中海, 2018)。其中断层的活动性主要是根据断层的地质地貌记录或地表观测获得的现今活动数据来判断,主要依赖于断层的最新活动时间(即“离逝时间”)、平均滑动速率和大地震平均复发间隔等定量参数,反映的实际上是断裂过去的活动状态。而断层的危险性针对的是活断层未来可能出现的活动状态,即在人类社会所关心时段内或工程寿命期内,断裂活动可能造成的灾害及其风险程度。这需要在综合分析断层不同段落与不同时间尺度的滑动速率、重复活动间隔和最近一次活动以来的离逝时间等基础上,进一步判断未来强震可能出现的位置、震级的大小、可能产生的地表断层分布与位移大小以及一旦发生强震可能造成的主要此生地质灾害类型及分布等等。

通常由于强活动性断层的强震频率高,往往也被认为是危险性高的断层,但事实上断层的活动性大小与其危险性高低并不完全等同。对于特定时间

窗而言,如未来 100 年内,一条活动性强烈的断裂或全新世断层危险性并不总是高于区域上所有第四纪一晚第四纪断层或活动性弱的断层。因为,对于第四纪或晚第四纪期间重复活动的断层,如果离逝时间接近断层的重复活动间隔就很可能意味着该断层未来的强震危险性会显著增加,即成为危险的“预警断层”。如,对比一条重复活动间隔在数百年至近千年的强活动断层和一条活动间隔在数千年至万年左右的中等或弱活动断层而言,如果前者刚刚通过大地震(通常指 $M \geq 7.0$ 地震)释放了应力-应变能,而后者距离上一次大地震活动的离逝时间已接近其重复活动间隔并演变为“预警断层”时,那么在社会关注的未来一段时间内(往往只是百年尺度),后者再次发生大地震的危险性就会明显高于前者。以汶川地震为例,古地震研究揭示,龙门山断裂带中段的大地震原地复发间隔是约 3000 yr(Ran et al., 2013),那么在 2008 年四川汶川大地震前,该断裂应属于预警断层或危险断裂,但当汶川大地震释放了积累的应变后,其发震段落的危险性就相应降低了。正是出于这方面的考虑,再加上抗震技术的提高和工程实践的需要,美国加州地质矿产局下属的“技术咨询委员会”最近建议用“危险断层”(Hazardous fault)和“非危险断层”来替代“AP 法案”中正在使用的“全新世活断层”术语,提出可在技术上和经济上难以承受断层造成破坏或损失的全新世活断层确定为“危险断层”,而将“预计在约 3 m 宽变形范围的地表累计垂直变形量不超过 10 cm,水平位移量不超过 30 cm 的活断层”归为“非危险断层”,因为对于这样的断层,位于其上的工程或建筑物可通过采取合理抗震措施来有效减轻潜在的断层活动影响或损失,而无需避让(Shlemon, 2010)。

从实用性角度,无论是为了使政府管理部门对活断层灾害进行有效地风险管理,还是让工程规划建设部门更好地应对活断层可能导致的工程地质问题,更关心的应该是断层危险性,而不仅仅是活动性。即在城市规划发展和重要基础设施建设中,必须充分了解和掌握活断层在人类关注的特定时段或工程寿命期内发生潜在活动的危险性及其可能导致的灾害风险程度,也就是需要从调查研究获得的已知活断层中,进一步利用相关的定量参数来综合评价断层活动的危险性及其可能造成灾害的风险性,并有效识别出需要重点防范或关注的“危险断层”,特指“经调查评价后认为建筑物或基础设施必须避让的活断层”(Lund et al., 2016),特别是那些最新地表断层作用的年龄已经接近或超过断层地质历史上重复发生地表断层作用平均时间间隔且能够造成显著地

表变形或破坏的活断层,这类似于日本地震地质学家松田时彦(Matsuda)早期提出的“预警断层(Warning fault)”(Matsuda, 1977)。因为它们才是未来活动危险性最大或致灾风险最高的断裂。目前,危险断层已被美国西部一些地州采用到新制定的活断层地表破裂灾害危险性评价指南中,并用于指导工程和建筑物避让活断层(Lund et al., 2016)。而且在新西兰和美国的加州及犹他州等活断层灾害问题突出的地区,都制定了要求新建的人居建筑有效避让危险活断层的法律法规,并在防灾减灾中有效发挥了作用,这显然非常值得活断层数量多且相关灾害问题特别突出的中国以及其它国家和地区学习和借鉴。

7 结论

通过综合分析国内外有关活断层定义与分类的历史、现状与应用进展等,可以获得以下主要认识或结论。

(1)活断层鉴定与评价的核心问题是“断层在人类关心的未来是否仍可能活动”,而断层活动的主要表现形式是地震和地表变形。因此,决定活断层定义的最关键参数,也是争论最多的是活断层的时限,并包括定义活断层的震级标准。目前国内外活断层定义中的时限主要集中在 5 个不同时间尺度:新构造、第四纪、晚第四纪、全新世和历史上。震级标准主要包括 3 类: $M \geq 5.0$ 的破坏性地震、 $M \geq 6.0$ 的强震和 $M \geq 6.5$ 的可能产生地表位移或变形的地震。

(2)在制定标准规范及法规和活断层探测与编图等具体应用中,定义活断层需要紧密结合区域实际情况与应用需求,综合考虑区域活动构造背景(包括现今地球动力学环境、地震构造或活动构造域等方面的差异)、应用目的、地质上的可操作性以及现有方法的制约等多种因素,其中前两者是最重要的。在构造活动强烈的板块边界带,晚第四纪和全新世等短时间尺度的活断层定义是适宜的,但在板内变形区和稳定大陆区,或包含了多种不同活动构造域的区域,第四纪和新构造等长时间尺度的活断层定义更为可取。同时,出于区域防震减灾需求时,活断层定义中宜采用 $M \geq 5.0$ 破坏性地震作为震级标准,而针对活断层避让目的,在定义中应该强调 $M \geq 6.5$ 可能产生地表位移或变形的地震。

(3)国内外对活断层的分级评价存在多种方案,但主要是基于断裂活动性(主要包括:地质-地貌表现、断层滑动速率、地震重复活动间隔)、断裂活动时代和综合地表变形与历史地震活动表现等指标的

断层分类方案。其中在规范标准和编图中,最常见的是基于断裂活动强度与频度(主要通过断层滑动速率与地震复发间隔两个定量参数来体现)和活动时代的分类方案。确定不同级别断层的具体定量参数时,需要综合考虑区域内主要活断层活动强度和活动时代的差异性与现有数据的多寡及有效性,从而达到分类方案可有效区分不同级别活动断裂的目的,从而为客观评价活断层的潜在活动危险性提供有效参考依据。

(4)在活断层评价中需要注意区分活断层的活动性与危险性,前者主要体现在断层的最新活动时间(或“离逝时间”)、平均滑动速率和大地震平均复发间隔等定量参数上,反映的是断裂过去的活动状态。而断层的危险性针对的是活断层未来可能出现的活动状态,即在人类社会所关心时段内或工程寿命期内,断裂活动可能造成的灾害及其风险程度。这需要在综合分析断裂活动性基础上,进一步判断未来强震可能出现的位置、震级的大小、地表断层的分布以及一旦发生强震可能造成的地质灾害类型及分布等,识别出危险断层或预警断层,或划分出断层的危险度,从而为政府管理部门和工程规划建设部门有效减轻、防控或管理活断层灾害风险提供更具实用性的依据。

(5)世界上典型国家和地区在活断层定义与分类方面的差异主要体现了所在区域活动构造动力学背景与应用目的不同,以及地质上可操作性的影响。但无一例外的是,在活断层比较发育且灾害影响显著的国家和地区,都十分重视全国范围内的活断层普查工作,把在活断层调查基础上综合编制可更新的且公开共享的全国性活断层图及空间数据库作为长期且重要的基础地质工作,以及有效应对活断层灾害风险和服务社会的重要方式。而实践表明,美国西部地州和新西兰等制定的活断层避让法规或规范,是当前世界上减轻活断层地表变形灾害风险的最有效措施,这非常值得活断层数量多且相关灾害问题突出的中国或类似的国家和地区借鉴。

致谢: 中国地质科学院地质力学研究所研究生周游、王一斐和胡萌萌参与了本文部分参考文献整理和文稿编辑,审稿专家对本文的修改完善提出了有益的意见和建议,在此一并表示衷心感谢。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41571013) and China Geological Survey (Nos. DD20160268 and DD20190396).

参考文献:

- H.И.尼古拉耶夫(丁国瑜等译). 1965. 苏联的新构造研究译文集[M]. 北京: 科学出版社.
- 北京市质量技术监督局. 2012. 北京市地方标准(DB11/T 893—2012): 地质灾害危险性评估技术规范[S]. 北京: 北京市质量技术监督局.
- 常士骅, 张苏民. 2007. 工程地质手册(第四版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社: 1099.
- 程绍平, 杨桂枝. 2008. 国外新构造研究进展述评[J]. 地震地质, 30(1): 31-43.
- 邓起东, 刘百箴, 张培震, 袁道阳. 1992. 活动断裂工程安全评价和位错量的定量评估[G]//邓起东主编. 活动断裂研究(2). 北京: 地震出版社: 236-246.
- 邓起东, 闻学泽. 2008. 活动构造研究-历史、进展与建议[J]. 地震地质, 30(1): 1-30.
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 杨晓平, 闵伟, 陈立春. 2003. 中国活动构造与地震活动[J]. 地学前缘, 10(特刊): 66-73.
- 邓起东, 张裕明, 环文林, 张鸿生, 许桂林, 刘一鸣, 邓瑞生, 李群, 刘行松, 杨天赐, 范福田. 1978. 我国地震活动和地震地质主要特征[J]. 科学通报, 23(4): 193-199.
- 邓起东. 1982. 中国的活动断裂[G]//中国地震学会地震地质专业委员会编. 中国活动断裂. 北京: 地震出版社: 19-27.
- 邓起东. 1991. 活动断裂研究的进展和方向(代序)[G]//邓起东主编. 活动断裂研究(1). 北京: 地震出版社: 1-6.
- 邓起东. 2002. 中国活动构造研究的进展与展望[J]. 地质论评, 18(2): 168-177.
- 邓起东. 2007. 中国活动构造图(1:400 万)[M]. 北京: 地震出版社.
- 丁国瑜. 1982. 中国内陆活动断裂基本特征的探讨(代前言)[G]//中国地震学会地震地质专业委员会编. 中国活动断裂. 北京: 地震出版社: 1-9.
- 丁国瑜. 1988. 关于地震断层研究的几个问题[G]//新疆维吾尔自治区地震局编. 中国地震断层研究. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社: 1-9.
- 丁国瑜. 1989. IGCP 第 206 项——全球主要活断层特性的对比: 中国活断层图集[M]. 北京: 地震出版社; 西安: 西安地图出版社: 121.
- 国家地震局. 1998. 中华人民共和国国家标准(GB/T 50267-97): 核电厂抗震设计规范[S]. 北京: 中华人民共和国建设部.
- 国家地震局地质研究所. 1979. 中华人民共和国地震构造图(1:400 万)及说明书[M]. 北京: 地图出版社.
- 国家地震局全国地震烈度区划编图组. 1978. 中国主要构造体系新活动和强震震中分布图(1:600 万)[M]. 北京: 国家地震局全国地震烈度区划编图组.
- 国家核安全局. 1994. 核电厂厂址选择中的地震问题(HAD101/01)[M]. 北京: 国家核安全局.
- 黄培华, 金凤英, 丁保田, 韩健. 1982. 地震地质学基础[M]. 北京: 地震出版社: 238.
- 黄玉昆, 邹和平, 张珂. 1996. 新构造学[M]. 广州: 广东省地图出版社: 249.
- 李坪, 汪良谋. 1977. 云南川西地区地震地质基本特征的探讨[G]//国家地震局西南烈度队. 西南地区地震地质及烈度区划探讨. 北京: 地震出版社: 1-17.
- 李起彤. 1991. 活断层及其工程评价[M]. 北京: 地震出版社: 169.

- 李四光. 1977a. 论地震[M]. 北京: 地质出版社: 173.
- 李四光. 1977b. 地震地质[M]. 北京: 科学出版社: 52.
- 李兴唐. 1987. 城市区域地壳稳定性评价原则[J]. 水文地质工程地质, 6: 21-26.
- 李兴唐. 1991. 活动断裂研究与工程评价[M]. 北京: 地质出版社.
- 李志义, 李祥根, 冉勇康. 1991. 新构造的基本特征[G]//丁国瑜. 中国岩石圈动力学概论——中国岩石圈动力学图集说明书. 北京: 地震出版社: 92-105.
- 刘光勋, 马廷著, 黄佩玉, 白玉芹. 1989. 中国主要活动断裂及其现今运动(1:14 000 000)[G]//马杏垣主编. 中国岩石圈动力学地图集. 北京: 中国地图出版社: 17.
- 刘光勋, 马廷著, 黄佩玉, 王宋贤. 1982. 中国东部活动断裂的现代构造运动[J]. 地震地质, 4(4): 1-14.
- 陆仲家, 黄培华. 1991. 地震地质简明教程[M]. 北京: 地震出版社: 363.
- 马廷著, 刘光勋, 黄佩玉, 白玉芹. 1991. 活动断裂及其现代运动[G]//丁国瑜. 中国岩石圈动力学概论——中国岩石圈动力学图集说明书. 北京: 地震出版社: 106-122.
- 马杏垣. 1987. 中国岩石圈动力学纲要(1:400 万中国及邻近海域岩石圈动力学图说明书)[M]. 北京: 地质出版社.
- 马宗晋. 1992. 活动构造基础与工程地震[M]. 北京: 地震出版社: 202.
- 彭岩. 1994. 日本出版《日本的活断层——地图和说明》[J]. 国际地震动态, 18(5): 28-29.
- 强祖基, 王洪涛. 1992. 活动构造研究[M]. 北京: 地震出版社: 117.
- 日本 1:200 万活断层图编纂组. 2000. 1:200 万日本列岛活断层图: 过去数十万年的断层活动特征[J]. 活断层研究, 19: 3-12(日文).
- 日本活断层研究会(劳秋元译). 1981. 日本及其周围的活断层: 其分布和活动程度[J]. 地震地质译丛, 3(6): 12-21.
- 松田时彦(卢振恒译). 1976. 活断层和地震的地质研究[G]// (苏) И.Е. 古宾, (日) 松田时彦, 等著(沈德富等译). 活断层研究. 北京: 地震出版社: 15-31.
- 松田时彦, 塚崎朋美, 萩谷莉. 2000. 日本陆域活断层与历史浅源地震分布以及陆域发震断层与地震目录[J]. 活断层研究, 19: 33-54(日文).
- 唐荣昌, 马声浩, 周荣军, 伍先国. 1993. 活动断裂的研究及四川主要活动断裂带特征[G]//唐荣昌, 韩渭宾. 四川活动断裂与地震. 北京: 地震出版社: 67-172.
- 藤田和夫(卢振恒, 译). 1981. 活断层的最新见解[J]. 地震地质译丛, 03(6): 21-25.
- 王东初. 1985. 日本活断层及其研究方法(I)[J]. 地震地质译丛, 07(1): 1-10.
- 王曰伦. 1957. 中国新构造运动的零拾[G]//中国科学院地学部编. 中国科学院第一次新构造运动座谈会发言记录. 北京: 科学出版社: 111-118.
- 隈元崇, 奥村晃史, 日本新活断层图工作组. 2000. 基于 GIS 的日本 1:25000 活断层编图新技术[J]. 活断层研究, 19: 13-22(日文).
- 吴中海, 张岳桥, 胡道功. 2014a. 新构造、活动构造与地震地质[J]. 地质通报, 33(4): 391-402.
- 吴中海, 赵根模, 龙长兴, 周春景, 范桃园. 2014b. 青藏高原东南缘现今大震活动特征及其趋势: 活动构造体系角度的初步分析结果[J]. 地质学报, 88(8): 1401-1416.
- 吴中海, 赵根模. 2013. 地震预报现状及相关问题综述[J]. 地质通报, 32(10): 1493-1512.
- 吴中海, 周春景. 2018. 中国及毗邻海区活动断裂分布图(1:500 万)(附说明书)[G]//郝爱兵, 李瑞敏. 中国地质环境图系(图件编号 00-01-05). 北京: 地质出版社.
- 吴中海. 2018. 活断层的术语、研究进展及问题思考[J]. 地球科学与环境学报, 40(06): 706-726.
- 谢广林. 1989. 中国主要活动断裂带卫星图像集[M]. 北京: 地震出版社.
- 徐锡伟, 韩竹军, 杨晓平, 张世民, 于贵华, 周本刚, 李峰, 马保起, 陈桂华, 冉永康. 2016. 中国及邻近地区地震构造图[M]. 北京: 地震出版社, 中国地图出版社.
- 徐锡伟, 闻学泽, 韩竹军, 陈桂华, 李传友, 郑文俊, 张世民, 任治坤, 许冲, 谭锡斌, 魏占玉, 王明明, 任俊杰, 何冲, 梁明剑. 2013. 四川芦山 7.0 级强震: 一次典型的盲逆断层型地震[J]. 科学通报, 58(20): 1887-1893.
- 徐锡伟, 于贵华, 马文涛, 冉永康, 陈桂华, 韩竹军, 张兰凤, 尤惠川. 2002. 活断层地震地表破裂“避让带”宽度确定依据与方法[J]. 地震地质, 24(4): 470-483.
- 徐锡伟. 2006. 活动断层、地震灾害与减灾对策问题[J]. 震灾防御技术, 1(1): 7-14.
- 徐煜坚. 1982. 论活动断裂[G]//中国地震学会地震地质专业委员会编. 中国活动断裂. 北京: 地震出版社: 10-13.
- 易明初. 2003. 新构造活动与区域地壳稳定性[M]. 北京: 地震出版社.
- 余伯良. 1957. 甘肃走廊新构造运动的特征与意义[G]//中国科学院地学部编. 中国科学院第一次新构造运动座谈会发言记录. 北京: 科学出版社: 119-126.
- 张文佑. 1957. 中国 X 型断裂与新构造运动的关系[G]//中国科学院地学部编. 中国科学院第一次新构造运动座谈会发言记录. 北京: 科学出版社: 84-87.
- 中国地震局. 2005. 中华人民共和国地震行业标准(DB/T 15—2005): 活动断层探测方法[M]. 北京: 地震出版社: 13.
- 中国地震局. 2014. 中华人民共和国地震行业标准(DB/T 53—2013): 1:50 000 活动断层填图[M]. 北京: 地震出版社: 14.
- 中国水利水电科学研究院. 2000. 中华人民共和国电力行业标准(DL 5073—2000): 水工建筑物抗震设计规范[S]. 北京: 中国水利水电科学研究院
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 2005a. 中华人民共和国国家标准(GB/T 18207.2-2005): 防震减灾术语(第 2 部分: 专业术语)[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 2005b. 中华人民共和国国家标准(GB/T 17741-2005): 工程场地地震安全性评价[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 2018. 中华人民共和国国家标准(GB/T 36072-2018): 活动断层探测[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会.
- 中华人民共和国国土资源部. 2004. 中华人民共和国地质矿产行业标准(DZ 0245—2004): 建设用地地质灾害危险性评估技术要求[S]. 北京: 中华人民共和国国土资源部.

- 中华人民共和国建设部. 2009. 中华人民共和国国家标准(GB 50021-2001): 岩土工程勘察规范(2009 年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 中华人民共和国铁道部. 2006. 中华人民共和国国家标准(GB 50111-2006): 铁路工程抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 2010. 中华人民共和国国家标准(GB 50011-2010): 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社.

References:

- AKI K, LEE W H K. 2003. Appendix 1: Glossary of interest to earthquake and engineering seismologist[C]//WILLIAM H K L, JENNINGS P C, KISSLINGER C, KANAMORI H (Ed.) International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology, Part A, Vol 81A. International Geophysics, Academic Press: 1793-1856.
- ALLEN C R, BERGER J, MUELLER I I, SAVAGE J. 1974. Earthquake Mechanism and Displacement Fields Close to Fault Zones: Report on the Sixth GEOP Research Conference[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 55(9): 836-840.
- ANS (American Nuclear Society). 2008. American national standard: criteria for investigations of nuclear facility sites for seismic hazard assessments[S]. USA: American Nuclear Society: 33.
- ANS (American Nuclear Society). 2010. American national standard: Criteria for Assessing Tectonic Surface Fault Rupture and Deformation at Nuclear Facilities[S]. USA: American Nuclear Society: 59.
- BASILI R, KASTELIC V, DEMIRCIÖGLU M B, GARCIA MORENO D, NEMSER E S, PETRICCA P, SBORAS S P, BESANA-OSTMAN G M, CABRAL J, CAMELBEECK T, CAPUTO R, DANCUI L, DOMAC H, FONSECA J, GARCÍA-MAYORDOMO J, GIARDINI D, GLAVATOVIC B, GULEN L, INCE Y, PAVLIDES S, SESETYAN K, TARABUSI G, TIBERTI M M, UTKUCU M, VALENSISE G, VANNESTE K, VILANOVA S, WÖSSNER J. 2013. The European Database of Seismogenic Faults (EDSF) compiled in the framework of the Project SHARE[OL/EB]. [2018-12-25]. <http://diss.rm.ingv.it/share-edsf/>, doi: 10.6092/INGV.IT-SHARE-EDSF.
- BASILI R, VALENSISE G, VANNOLI P, BURRATO P, FRACASSI U, MARIANO S, TIBERTI M M, BOSCHI E. 2008. The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: Summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology[J]. Tectonophysics, 453(1-4): 20-43, doi:10.1016/j.tecto.2007.04.014.
- BATATIAN D. 2002. Minimum Standards for Surface Fault Rupture Hazard Studies: Salt Lake County Geologic Hazards Ordinance - Chapter 19.75, Appendix A[S]. UT: Salt Lake County.
- BECKER J, SAUNDERS W, VAN DISSEN R. 2005. Planning for the Development of Land on or Close to Active Faults: A study of the adoption and use of the Active Fault Guidelines[R]. New Zealand: Institute of Geological & Nuclear Sciences science report: 63.
- Beijing Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision. 2012. Local Standard of Beijing City (DB11/T 893—2012): Code for Assessment of Geological Hazard[S]. Beijing: Beijing Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision(in Chinese).
- BLÉS J L, COLLEAU A, FOURNIGUET J, GODEFROY P, LENÔTRE N, SAURET B, COMBES P, DUBIÉJ Y, VASKOUD P. 1991. Proposal for classification of fault activity in an intraplate collision setting: Definitions and examples[J]. Tectonophysics, 194(3): 279-293.
- BONCIO P, LAVECCHIA G, PACE B. 2004. Defining a model of 3D seismogenic sources for Seismic Hazard Assessment applications: the case of central Apennines (Italy)[J]. Journal of Seismic, 8(3): 407-425.
- BRYANT W A, HART E W. 2007. Fault-rupture hazard zones in California—Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning Act with index to earthquake fault zone maps: California Geological Survey Special Publication 42 [Interim Revision 2007][OL/EB]. [2018-12-25]. <ftp://ftp.consrv.ca.gov/pub/dmg/pubs/sp/Sp42.pdf>: 42.
- BRYANT W A. 2010. History of the Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning Act, California[R]. USA: Environmental and Engineering Geoscience, v. XVI, 1: 7-18.
- CANNON E C, BÜRGEMANN R, CRONE A J, MACHETTE M N, DART R L. 2007. Map and data for Quaternary faults and fault systems on the Island of Hawai'i: U.S[R]. Geological Survey Open-File Report 2007-1284: 81, 1 plate.
- CAPUTO R, CATALANO S, MONACO C, ROMAGNOLI G, TORTORICI G, TORTORICI L. 2010. Active faulting on the island of Crete (Greece)[J]. Geophysical Journal International, 183: 111-126.
- CAPUTO R, CHATZIPETROS A, PAVLIDES S, SBORAS S. 2012. The Greek Database of Seismogenic Sources (GreDaSS): state-of-the-art for northern Greece[J]. Annals of Geophysics, 55(5): 859-894.
- CAPUTO R, HELLY B. 2008. The use of distinct disciplines to investigate past earthquakes[J]. Tectonophysics, 453(1-4): 7-19.
- CEA (China Earthquake Administration). 2005. Earthquake industry standard of the People's Republic of China (DB/T 15—2005): Method for Surveying and Prospecting of Active Fault[S]. Beijing: Seismological Press: 13(in Chinese).
- CEA. 2014. Earthquake Industry Standard of the People's Republic of China (DB/T 53—2013): Mapping of Active Fault in 1:50 000[M]. Beijing: Seismological Press: 14(in Chinese).
- CELLO G, MAZZOLI S, TONDI E, TURCO E. 1997. Active tectonics in the central Apennines and possible implication for

- seismic hazard analysis in peninsular Italy[J]. *Tectonophysics*, 272(1): 443-460.
- Central Geological Survey. 2010. The manual and map of active fault of Taiwan[OL/EB]. [2018-12-25]. [http://fault.moeacgs.gov.tw/UploadFiles/images/500K/C_activefault\(A4\)_E.jpg](http://fault.moeacgs.gov.tw/UploadFiles/images/500K/C_activefault(A4)_E.jpg).
- CHANG Shi-biao, ZHANG Su-min. 2007. *Engineering Geology Handbook* (4th edition)[M]. Beijing: China Building Industry Press(in Chinese).
- CHENG Shao-ping, YANG Gui-zhi. 2008. Current advance of overseas research on neotectonics: A review and comments[J]. *Seismology and Geology*, 30(1): 31-43(in Chinese with English abstract).
- CHRISTENSON G E, BATATIAN L D, NELSON C V. 2003. Guidelines for evaluating surface-fault-rupture hazards in Utah[J]. *Utah Geological Survey Miscellaneous Publication*, 03-6: 14.
- CHRISTENSON G E, BRYANT B A. 1998. Surface-faulting hazards and land-use planning in Utah[C]//LUND W R, editor. *Western States Seismic Policy Council proceedings volume. Basin and Range Province Seismic-Hazards Summit: Utah Geological Survey Miscellaneous Publication 98-2*: 63-73.
- CHRISTOPHERSEN A, LITCHFIELD N, BERRYMAN K, THOMAS R, BASILI R, WALLACE L, RIES W, HAYES G, HALLER K M, YOSHIOKA T, KOEHLER R D, CLARK D, WOLFSON-SCHWEHR M, BOETTCHER M S, VILLAMOR P, HORSPOOL N, ORNTHAMMARATH T, ZUÑIGA R, LANGRIDGE R M, STIRLING M W, GODED T, COSTA C, YEATS R. 2015. Development of the global earthquake model's neotectonic fault database[J]. *Natural Hazards*, 79(1): 111-135. doi:10.1007/s11069-015-1831-6.
- CLARK D, MCPHERSON A, VAN DISSEN R. 2012. Long-term behaviour of Australian stable continental region (SCR) faults[J]. *Tectonophysics*, 566: 1-30.
- COWAN H, MACHETTE M N, AMADOR X, KAREN S, DART R L, BRADLEY L A. 2000. *Map and Database of Quaternary Faults and Folds in the Vicinity of Managua, Nicaragua: U.S[R]*. Geological Survey Open-File Report 00-0437: 61, 1 plate (1:750 000 scale).
- CRONE A J, MACHETTE M N, BOWMAN J R. 1997. The episodic nature of earthquakes in the stable interior of continents as revealed by paleoseismicity studies of Australian and North American Quaternary faults[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44(1): 203-214.
- DENG Qi-dong, LIU Bai-chi, ZHANG Pei-zhen, YUAN Dao-yang. 1992. Research of active fault in evaluating engineering safety and assessing amount of displacement[G]//DENG Qi-dong (ed). *Research on Active Fault(2)*. Beijing: Seismological Press: 236-246(in Chinese).
- DENG Qi-dong, WEN Xue-ze. 2008. A review on researches of active tectonics—history, progress and suggestions[J]. *Seismology and Geology*, 30(1): 1-30(in Chinese with English abstract).
- DENG Qi-dong, ZHANG Pei-zhen, RAN Yong-kang, YANG Xiao-ping, MIN Wei, CHEN Li-chun. 2003. Active tectonics and earthquake activities in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 10 (special issue): 66-73(in Chinese with English abstract).
- DENG Qi-dong, ZHANG Yu-ming, HUAN Wen-lin, ZHANG Hong-sheng, XU Gui-lin, LIU Yi-ming, DENG Rui-sheng, LI Qun, LIU Xing-song, YANG Tian-ci, FAN Fu-tian. 1978. The main characteristics of seismicity and seismogeology in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 23(4): 193-199(in Chinese).
- DENG Qi-dong. 1982. The active faults in China[G]//Committee on Seismogeology. The Seismological Society of China (ed). *The Active Faults in China*. Beijing: Seismological Press: 19-27(in Chinese).
- DENG Qi-dong. 1991. Research progress and direction of active faults (With Preface)[G]//Research on Active Fault(1). Beijing: Seismological Press: 1-6(in Chinese).
- DENG Qi-dong. 2002. Advances and overview on researches of active tectonics in China[J]. *Geological Review*, 48(2): 168-177(in Chinese with English abstract).
- DENG Qi-dong. 2007. *China's Active Tectonic Map (1:4 000 000)*[M]. Beijing: Seismological Press(in Chinese).
- DEPOLO C M, SLEMMONS D B. 1997. Age criteria for active faults in the Basin and Range Province[C]//LUND W R editor. *Western States Seismic Policy Council proceedings volume. Basin and Range Province Seismic-Hazards Summit: Utah Geological Survey Miscellaneous Publication 98-2*: 74-83.
- DEPOLO C M. 1994. The maximum background earthquake for the Basin and Range Province, western North America[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(2): 466-472.
- DING Guo-yu. 1982. A discussion on the basic characteristics of the active faults in the Chinese continent (With Preface)[G]//Committee on Seismogeology. The Seismological Society of China (ed). *The Active Faults in China*. Beijing: Seismological Press: 1-9(in Chinese).
- DING Guo-yu. 1988. Several problems on earthquake fault research (substitute for preface)[G]//Seismological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region (ed). *Research on Earthquake Fault of China*. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House: 1-9(in Chinese).
- DING Guo-yu. 1989. *Chinese Working Group of Project 206 in IGCP: Atlas of Active Faults in China*[M]. Beijing: Seismological Press; Xi'an: Xi'an Map Publishing House: 121(in Chinese).
- DISS Working Group. 2015. *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS)*, Version 3.2.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M5.5 in Italy and surrounding areas[OL/EB]. [2018-12-26]. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.0.

- DUMAN T Y, ÇAN T, EMRE Ö, KADIRIOĞLU F T, BAŞTÜRK N B, KILIÇ T, ARSLAN S, ÖZALP S, KARTAL R F, KALAFAT D, KARAKAYA F, AZAK T E, ÖZEL N M, ERGINTAV S, AKKAR S, ALTINOK Y, TEKIN S, CINGÖZ A, KURT A İ. 2016. Seismotectonic database of Turkey[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(8): 3277-3316. DOI: 10.1007/s10518-016-9965-9.
- EGUEZ A, ALVARADO A, YEPES H, MACHETTE M N, COSTA C, DART R L. 2003. Database and Map of Quaternary faults and folds of Ecuador and its offshore regions[R]. U.S. Geological Survey Open-File Report 03-289: 77.
- EILEEN M. 2006. "Active faults-What is an active fault", Te Ara-Encyclopedia of New Zealand. [OL/EB]. [2018-12-26]. <http://www.teara.govt.nz/en/active-faults/page-1>.
- EMBLETON C. 1987. Neotectonics and morphotectonic research[J]. *Z. Geomorph. N. F. Supplement*, 63: 1-7.
- FRASER W A. 2001. California Division of Safety of Dams Fault Activity Guidelines: California Division of Safety of Dams, Sacramento, CA, 11 p, Electronic document[OL/EB]. [2018-12-26]. <http://www.water.ca.gov/damsafety/docs/fault.pdf>.
- GALADINI F, FALCUCCI E, GALLI P, GIACCIO B, GORI S, MESSINA P, MORO M, SAROLI M, SCARDIA G, SPOSATO A. 2012. Time intervals to assess active and capable faults for engineering practices in Italy[J]. *Engineering Geology*, 139-140(9), 50-65. doi:10.1016/j.enggeo.2012.03.012.
- GALADINI F, MELETTI C, VITTORI E. 2001. Major active faults in Italy: available surficial data[J]. *Netherlands Journal of Geosciences*, 80(3-4): 273-296.
- GANAS A, OIKONOMOU I A, TSIMI C. 2013. NOAFAULTS: A digital database for active faults in Greece[C]//*Bulletin of the Geological Society of Greece*, Vol. XLVII, 2013 Proceedings of the 13th International Congress, Chania: 518-530.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization and Administration. 2005a. State Standard of the People's Republic of China (GB/T 18207.2—2005): Terminology of Protecting Against and Mitigating Earthquake Disasters—Part 2: Special Technical Terms[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization and Administration(in Chinese).
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization and Administration. 2005b. National standard of the People's Republic of China (GB/T 17741-2005): Seismic safety assessment of engineering sites[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization and Administration(in Chinese).
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization and Administration. 2018. The State Standard of the People's Republic of China (GB/T 36072—2018): Surveying and Prospecting of Active Fault[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization and Administration(in Chinese).
- GRANT L B. 2003. Paleoseismology[G]//WILLIAM H K L, JENNINGS P C, KISSLINGER C, KANAMORI H. *International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology*, Part A, Vol 81A. International Geophysics, Academic Press: 475-489.
- GÜRPINAR A. 1989. Importance of historical earthquakes in research in the siting of nuclear facilities[C]//Workshop "Historical earthquakes in the Ibero-Maghreb region. Methodological approach and case studies", Lisbon: 15-17.
- HALLER K M, MACHETTE M N, DART R L, RHEA B S. 2004. U.S. Quaternary fault and fold database released[J]. *Eos Trans. AGU*, 85(22): 218.
- HALLER K M, MACHETTE M N, DART R L. 1993. Maps of Major Active Faults, Western Hemisphere International Lithosphere Program (ILP) Project II-2: Guidelines for U.S. Database and Map[R]. U.S. Geological Survey Open-File Report 93-338: 45.
- HANCOCK P L, WILLIAMS G D. 1986. Neotectonics[J]. *Journal of the Geological Society*, 143(2): 325-326.
- HANCOCK P L. 1988. Neotectonics[J]. *Geology Today*, 4(2): 57-61.
- HUANG Pei-hua, JIN Feng-ying, DING Bao-tian, HAN Jian. 1982. *Basis of Seismogeology*[M]. Beijing: Earthquake Press: 238(in Chinese).
- HUANG Yu-kun, ZOU He-ping, ZHANG Ke. 1996. *Neotectonics*[M]. Guangzhou: Guangdong Map Publishing House: 249(in Chinese).
- IAEA (International Atomic Energy Agency). 1991. *Earthquakes and Associated Topics in Relation to Nuclear Power Plant Siting*[S]. Safety Series No. 50-SG-S1, Revision 1.
- IAEA. 2003. *Site evaluation for nuclear installations: safety Requirements*[S]. Safety Standards Series No. NS-R-3, Vienna: IAEA.
- IAEA. 2010. *Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations*[S]. IAEA Safety Standards Series No. SSG-9, Vienna: IAEA.
- IAEA. 2015. *The Contribution of Palaeoseismology to Seismic Hazard Assessment in Site Evaluation for Nuclear Installations*[S]. IAEA-TECDOC-1767, Vienna: IAEA.
- Institute of Geology, SSB. 1979. *The Seismotectonic Map of People's Republic of China (Scale: 1:4 000 000) (Attached a Summary Instruction)*[M]. Beijing: Cartographic Publishing House(in Chinese).
- ISPRA (Italian National Institute for Environmental Protection and Research). 2017. *Italy Hazards from capable faulting*[OL/EB]. [2018-12-26]. <http://www.isprambiente.gov.it/en/projects/>

- soil-and-territory /italy-hazards-from-capable-faulting/default.
- IWHR (China Institute of Water Resources and Hydropower Research). 2000. Electric Power Industry Standard of the People's Republic of China (DL 5073—2000): Specifications for Seismic Design of Hydraulic Structures[S]. Beijing: IWHR (in Chinese).
- Japan Active Fault Research Association (translated by LAO Qiu-yuan). 1981. Active faults in and around Japan: their distribution and activity[J]. Seismic Geological Translation, 3(6): 12-21(in Chinese).
- Kazuo Fujita (translated by LU Zhen-heng). 1981. The newest insights into active faults[J]. Translated Collection of Seismology and Geology, 3(6): 21-25(in Chinese).
- KERR J, NATHAN S, DISSEN R V, WEBB P, BRUNSDON D, KING A. 2003. Planning for Development of Land on or Close to Active Faults: A guideline to assist resource management planners in New Zealand[R]. Institute of Geological & Nuclear Sciences Science Report: 63.
- KLAUS K E N, JAMES P. MEHL JR., JULIA A JACKSON. 2011. Glossary of geology (Fifth Edition, Revised)[M]. USA: American Geosciences Institute: 783.
- KUMAMOTO T, OKUMURA K, The Working Group of New Active Fault Map. 2000. Technical aspect of new active fault mapping with a scale of 1:25 000 by geographic information system[J]. Active Fault Research, 19: 13-22(in Japanese with English abstract).
- LANGRIDGE R M, RIES W F, LITCHFIELD N J, VAN DISSEN R J, VILLAMOR P. 2014b. The 1:250 000 Active Faults Database of New Zealand: database description and data dictionary[R]. GNS Science Report. Lower Hutt: GNS Science.
- LANGRIDGE R M, RIES W F, LITCHFIELD N J, VILLAMOR P, VAN DISSEN R J, BARRELL D J A, RATTENBURY M S, HERON D W, HAUBROCK S, TOWNSEND D B, LEE J M, BERRYMAN K R, NICOL A, COX S C, STIRLING M W. 2016. The New Zealand Active Faults Database[J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 59(1): 86-96, DOI: 10.1080/00288306.2015.1112818.
- LANGRIDGE R M, RIES W F. 2014a. Active Fault Mapping and Fault Avoidance Zones for Central Hawkes Bay District: 2013 Update[R]. GNS Science Consultancy Report: 48.
- LAUVEN A, THIELE R, MACHETTE M N, DART R L, HALLER K M. 2000. Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Bolivia and Chile[R]. U.S. Geological Survey Open-File Report 00-0283: 38, 2 plates.
- LAWSON A C. 1908. The California earthquake of April 18, 1906. Report of the State Earthquake Investigation Commission, Parts 1 and 2[M]. Washington: Carnegie Institution of Washington: 87, 451.
- LI Ping, WANG Liang-mou. 1977. A discussion on the basic features of earthquake geology the Yunnan-West Sichuan region[G]//Southwest intensity team of State seismological Bureau. Discussion on Earthquake Geology and Intensity Zoning in Southwest China. Beijing: Seismological Press: 1-17(in Chinese).
- LI Qi-tong. 1991. Active Fault and Its Engineering Evaluation[J]. Beijing: Seismological Press: 169(in Chinese).
- LI Si-guang. 1977a. The theory of the earthquake[M]. Beijing: Geological Publishing House: 173(in Chinese).
- LI Si-guang. 1977b. Seismic geological[M]. Beijing: Science Press: 52(in Chinese).
- LI Xing-tang. 1987. The principles for evaluating crustal stability in urban areas[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 6: 21-26(in Chinese).
- LI Xing-tang. 1991. Study on active faults and engineering evaluation[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- LI Zhi-yi, LI Xiang-gen, RAN Yong-kang. 1991. Basic characteristics of Neotectonics[G]//DING Guo-yu (ed). Lithospheric Dynamics of China—Explanatory Notes for the Atlas of Lithospheric Dynamics of China. Beijing: Seismological Press: 92-105(in Chinese).
- LITCHFIELD N, BERRYMAN K, THOMAS R. 2013b. Data Dictionary, GEM Faulted Earth[OL/EB]. [2018-12-26]. www.nexus.globalquakemodel.org/gem-faulted-earth/posts/.
- LITCHFIELD N, WYSS B, CHRISTOPHERSEN A, THOMAS R, BERRYMAN K, HENSHAW P, VILLAMOR P. 2013a. Guidelines for compilation of neotectonic faults, folds and fault sources, GEM Faulted Earth[OL/EB]. [2018-12-26]. www.nexus.globalquakemodel.org/gem-faulted-earth/posts/.
- LIU Guang-xun, MA Ting-zhu, HUANG Pei-yu, BAI Yu-qin. 1989. Major active faults and their recent movement (1:14 000 000) [G]//MA Xing-yuan (ed). Lithospheric Dynamics Atlas of China. Beijing: China Cartographic Publishing House: 17(in Chinese).
- LIU Guang-xun, MA Ting-zhu, HUANG Pei-yu, WANG Song-xian. 1982. Present-day tectonic movement along active faults in the east of China's mainland[J]. Seismology and Geology, 4(4): 1-14(in Chinese).
- LOUDERBACK G D. 1950. Faults and engineering geology[M]. Berkley: Geological Society of America: 125.
- LU R, XU X, HE D, LIU B, TAN X, WANG X. 2016. Coseismic and blind fault of the 2015 Pishan Mw 6.5 earthquake: Implications for the sedimentary-tectonic framework of the western Kunlun Mountains, northern Tibetan Plateau[J]. Tectonics, 35: 956-964, doi:10.1002/2015TC004053.
- LU Zhong-jia, HUANG Pei-hua. 1991. A concise tutorial on seismic geology[M]. Beijing: Earthquake Press: 363(in Chinese).
- LUND W R, CHRISTENSON G E, BATATIAN L D, NELSON C V. 2016. Guidelines for evaluating surface fault-rupture hazards in Utah[C]//BOWMAN S D, LUND W R, editors. Guidelines for investigating geologic hazards and preparing engineering-geology reports, with a suggested approach to geologic-hazard ordinances in Utah: Utah Geological Survey Circular 122: 31-58.
- LUND W R. 1998. The Basin and Range Seismic-Hazards Sum-

- mit[C]//LUND W R, editor. Western States Seismic Policy Council proceedings volume, Basin and Range Province Seismic-Hazards Summit: Utah Geological Survey Miscellaneous Publication 98-2: 1-2.
- LUNINA O V, CAPUTO R, GLADKOV A A, GLADKOV A S. 2014. Southern East Siberia Pliocene-Quaternary faults: Database, analysis and inference[J]. *Geoscience Frontiers*, 5(2014): 605-619. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2013.12.006>.
- MA Ting-zhu, LIU Guang-xun, HUANG Pei-yu, BAI Yu-qin. 1991. Major active faults and their recent movement[C]//DING Guo-yu (ed). *Lithospheric Dynamics of China—Explanatory Notes for the Atlas of Lithospheric Dynamics of China*. Beijing: Seismological Press: 106-122(in Chinese).
- MA Xing-yuan. 1987. Outline of Chinese lithospheric dynamics (1:400 000 map of lithospheric dynamics in China and adjacent waters)[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- MA Zong-jin. 1992. Active structural foundations and engineering earthquakes[M]. Beijing: Earthquake Press: 202(in Chinese).
- MACHETTE M N, HALLER K M, WALD L. 2005. Understanding earthquake hazards throughout the united states: Quaternary Fault and Fold Database for the Nation (Version 1.1)[OL/EB]. [2018-12-26]. <https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3033/>.
- MACHETTE M N, PERSONIUS S F, KELSON K I, DART R L, HALLER K M. 2000. Map and data for Quaternary faults and folds in New Mexico[R]. U.S. Geological Survey Open-File Report 98-521 (electronic version): 367.
- MACHETTE M N. 2000. Active, capable, and potentially active fault—a paleoseismic perspective[J]. *Journal of Geodynamics*, 29(3): 387-392.
- Matsuda Shihiko (translated by LU Zhen-heng). 1976. Geological study of active faults and earthquakes[G]//Active Fault Research. Beijing: Seismological Press: 15-31(in Chinese).
- MATSUDA T, KINUGAS Y. 1991. Active faults in Japan[J]. *Epi-sodes*, 14(3): 188-199.
- MATSUDA T, TSUKAZAKI T, HAGINOYA M. 2000. Distribution of active faults and historical shallow earthquakes of Japanese Islands, with a catalog of on-land seismogenic faults and earthquakes[J]. *Active Fault Research*, 19: 3-12(in Japanese with English abstract).
- MATSUDA T. 1975. Magnitude and recurrence interval of earthquakes from a fault (in Japan)[J]. *Earthquake*, 28: 269-283.
- MATSUDA T. 1977. Estimation of future destructive earthquakes from active faults on land in Japan[J]. *Journal Phys. Earth Supply*, 25(9): 251-260.
- MC, PRC (Ministry of Construction of the People's Republic of China). 2009. The State Standard of the People's Republic of China (GB 50021—2001): Code for Investigation of Geotechnical Engineering[S]. Jointly issued by the Ministry of Construction & General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Beijing: China Building Industry Press(in Chinese).
- MCCALPIN J. 2009. *Paleoseismology*, Second edition[M]. London: Academic Press: 629.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2010. State Standard of the People's Republic of China (GB 50011—2010): Code for Seismic Design of Buildings[S]. Beijing: China Building Industry Press(in Chinese).
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. 2004. Standard for the geological and mineral industry of the People's Republic of China (DZ 0245—2004): technical requirements for geological hazard assessment of construction land[S]. Beijing: Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China(in Chinese).
- MÖRNER N A, ADAMS J. 1989. Paleoseismicity and neotectonics[J]. *Tectonophysics*, 163(3-4): 181-184.
- MR, PRC (Ministry of Railways of the People's Republic of China). 2006. State Standard of the People's Republic of China (GB 50111—2006): Code for Seismic Design of Railway Engineering[S]. Beijing: China Planning Press(in Chinese).
- National Nuclear Security Administration. 1994. Earthquake Problems in the Selection of Nuclear Power Plant Sites (HAD101/01)[M]. Beijing: National Nuclear Safety Administration(in Chinese).
- National Seismic Intensity Zoning Group of National Seismological Bureau. 1978. Distribution map of new activity and strong earthquakes in major tectonic systems in China (1:60 Million)[M]. Beijing: National Seismic Intensity Zoning Group of National Seismological Bureau(in Chinese).
- NESC (Nevada Earthquake Safety Council). 1998. Guidelines for Evaluating Potential Surface Fault Rupture/Land Subsidence Hazards in Nevada[OL/EB]. [2018-12-26]. <http://www.nbm.unr.edu/nesc/guideines.htm>.
- NSC (Nuclear Safety Commission of Japan). 2006. Regulatory guide for reviewing seismic design of nuclear power reactor facilities[OL/EB]. [2018-12-26]. http://www.nsc.go.jp/NSCenglish/topics/seismic_safety.htm.
- PAVLIDES S B. 1989. Looking for a definition of neotectonics[J]. *Terra Nova*, 1(3): 233-235.
- PAVLIDES S, CAPUTO R, SBORAS S, CHATZIPETROS A, PAPATHANASIOU G, VALKANIOTIS S. 2010. The Greek Catalogue of Active Faults and Database of Seismogenic Sources[J]. *Bulletin Geological Society of Greece*, XLIII/1: 486-494.
- PAVLIDES S, VALKANIOTIS S, CHATZIPETROS A. 2007. Seismically capable faults of Greece and their use in seismic hazard assessment, Proceedings of the 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering[J]. *Thessaloniki*, 25-28: 1609.
- PENG Yan. 1994. The “Active Fault of Japan—the Map and Explanation” has been published in Japan[J]. *Recent Developments in World Seismology*, 18(5): 28-29(in Chinese).

- QIANG Zu-ji, WANG Hong-tao. 1992. Active tectonic study[M]. Beijing: Earthquake Press: 117(in Chinese).
- RAN Yong-kang, HEN Wen-shan, XU Xi-wei, CHEN Li-chun, WANG Hu, YANG Chih-cheng, DONG Shao-peng. 2013. Paleoseismic events and recurrence interval along the Beichuan-Yingxiu fault of Longmenshan fault zone, Yingxiu, Sichuan, China[J]. Tectonophysics, 584(22): 81-90.
- Research Group for Active Faults of Japan. 1992. Maps of Active Faults in Japan with an Explanatory Text[M]. Tokyo: University of Tokyo Press: 73.
- SELLA G F, DIXON T H, MAO A. 2002. REVEL: A model for Recent plate velocities from space geodesy[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 107(B4): 2081, doi:10.1029/2000JB000033.
- SHERARD J L, CLUFF L S, ALLEN C R. 1974. Potentially active faults in dam foundations[J]. Géotechnique, 24(3): 367-428.
- SHLEMON R J. 2010. A proposed mid-Holocene age definition for hazardous faults in California[J]. Environmental and Engineering Geoscience, 6(1): 55-64.
- SHYU J B H, CHUANG Y R, CHEN Y L, LEE Y R, CHENG C T. 2016. A new on-land seismogenic structure source database from the Taiwan Earthquake Model (TEM) project for seismic hazard analysis of Taiwan. Terr. Atmos[J]. Ocean. Sci., 27: 311-323, doi: 10.3319/TAO.2015.11.27.02(TEM).
- SHYU J B H, SIEH K, AVOUAC J P, CHEN W S, CHEN Y G. 2006. Millennial slip rate of the Longitudinal Valley fault from river terraces: Implications for convergence across the active suture of eastern Taiwan[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 111, B08403, doi: 10.1029/2005JB003971.
- SHYU J B H, SIEH K, CHEN Y G, LIU C S. 2005. Neotectonic architecture of Taiwan and its implications for future large earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 110: B08402, doi: 10.1029/2004JB003251.
- SLEMMONS D B, DEPOLO C M. 1986. Evaluation of active faulting and associated hazards[G]//WALLACE R E, ed. Washington D.C.: National Academy Press: 45-62.
- SLEMMONS D B, MCKINNEY R. 1977. Definition of 'Active Fault' (No. WES-MP-S-77-8)[C]//Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg Miss.
- SSB (State Seismological Bureau). 1998. The State Standard of the People's Republic of China (GB/T 50267-97): Code for Seismic Design of Nuclear Power Plants[S]. Beijing: Ministry of Construction of the People's Republic of China(in Chinese).
- TANG Rong-chang, MA Sheng-hao, ZHOU Rong-jun, WU Xian-guo. 1993. Research on active faults and features of main active fault[G]//Active faults and earthquakes in sichuan. Beijing: Seismological Press(in Chinese).
- The Research Group for Active Faults of Japan. 1980. Active faults in and around Japan: the distribution and the degree of activity[J]. Journal of Natural Disaster Science, 2(2): 61-99.
- The Working Group for Compilation of 1:2 000 000 Active Faults of Japan. 2000. New 1:2 000 000 active faults map of Japan[J]. Active Fault Research, 19: 3-12(in Japanese with English abstract).
- TONDI E. 1998. Active and capable fault segments in the central Apennines (Italy)[C]//CELLO G, DEIANA G, INVERNIZZI C, TONDI, E. (Eds.). The Resolution of Geological Analysis and Models for Earthquake Faulting Studies. Proceedings Volume of International Workshop: 91.
- TRIFONOV V G, MACHETTE M N. 1993. The world map of major active faults project[J]. Annali di Geofisica, 36(3-4): 225-236.
- TRIFONOV V G. 1995. World map of active faults (preliminary results of studies)[J]. Quaternary International, 25: 3-12.
- U.S. Geological Survey. 2006. Quaternary fault and fold database for the United States[OL/EB]. [2018-12-26]. <http://earthquakes.usgs.gov/hazards/qfaults/>.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission (US NRC). 1997. Identification and characterization of seismic sources and determination of safe shutdown earthquake ground motion[S]. Regulatory Guide 1.165. Washington, DC: US NRC.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission (US NRC). 2007. A Performance-Based Approach to Define the Site-Specific Earthquake Ground Motion[S]. Regulatory Guide DG-1.208. Washington, DC: US NRC.
- US Atomic Energy Commission (US AEC). 1973. Seismic and geologic siting criteria for nuclear power plants[S]. US Federal Register 38, No. 218, 23 Nov.
- USGS. 2019. Earthquake Glossary-active fault [EB/OL]. [2019-01-25]. <http://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=active%20fault>.
- WALLACE R E. 1981. Active faults, paleoseismology, and earthquake hazards in the Western United States[C]//SIMPSON D W, RICHARDS P G (Eds.), Earthquake Prediction — An International Review. Washington D.C.: American Geophysical Union: 209-216.
- WALLACE R E. 1986. Overview and recommendations[C]//WALLACE R E(Ed.). Studies in geophysics-Active Tectonics. Washington, D.C.: National Academy Press: 3-19.
- WANG Dong-chu. 1985. Japanese active faults and their research methods(I)[J]. Translated Collection of Seismology and Geology, 07(1): 1-10(in Chinese).
- WANG Yue-lun. 1957. Collection of neotectonic movements in China[C]// Department of Geology, Chinese Academy of Sciences. Proceedings of the first symposium on neotectonic movement of the Chinese Academy of Sciences. Beijing: Science Press: 111-118(in Chinese).
- WIKIPEDIA. 2018. The free encyclopedia of Wikipedia, Active fault, [EB/OL]. [2018-12-29]. http://en.wikipedia.org/wiki/Active_fault.
- WILLIS B. 1923. Fault map of California; faults of the Coast Ranges of California (abstract with discussion by G. H. Ashley and the author)[J]. Deans Notes, 15(28): 258-259.

- WOESSNER J, LAURENTIU D, GIARDINI D, CROWLEY H, COTTON F, GRÜNTAL G, VALENSISE G, ARVIDSSON R, BASILI R, DEMIRIOGLU M B, HIEMER S, MELETTI C, MUSSON R W, ROVIDA A N, SESETYAN K, STUCCHI M, The SHARE Consortium. 2015. The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(12): 3553-3596, DOI: 10.1007/s10518-015-9795-1.
- WOOD H O. 1916. The earthquake problem in the western United State[J]. *Seism. Soc. Am. Bull*, 6: 181-217.
- WSSPC (Western States Seismic Policy Council). 1997. Policy Recommendation 08-2—Definition of fault activity for the Basin and Range Province[R]. USA: Western States Seismic Policy Council: 6.
- WSSPC (Western States Seismic Policy Council). 2011. Policy Recommendation 11-2—Definition of fault activity for the Basin and Range Province[R]. USA: Western States Seismic Policy Council: 6.
- WSSPC (Western States Seismic Policy Council). 2015. Policy Recommendation 15-3—Definitions of recency of surface faulting for the Basin and Range Province[S]. Western States Seismic Policy Council: 5.
- WU Zhong-hai, ZHANG Yue-qiao, HU Dao-gong. 2014a. Neotectonics, active tectonics and earthquake geology[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(4): 391-402(in Chinese with English abstract).
- WU Zhong-hai, ZHAO Gen-mo, LONG Chang-xing, ZHOU Chun-jing, FAN Tao-yuan. 2014b. The Seismic Hazard Assessment around South-East Area of Qinghai-Xizang Plateau: A Preliminary Results from Active Tectonics System Analysis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(8): 1401-1416(in Chinese with English abstract).
- WU Zhong-hai, ZHAO Gen-mo. 2013. The earthquake prediction status and related problems: A review[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(10): 1493-1512(in Chinese with English abstract).
- WU Zhong-hai, ZHOU Chun-jing. 2018. Distribution Map of Active Faults in China and Its Adjacent Sea Area (1:5 000 000) (Attached Explanation)[G]//HAO Ai-bing, LI Rui-min, (eds). *Atlas Sets of Geological Environment of China (00-01-05)*. Beijing: Geological Publishing House, Map Number: 00-01-05(in Chinese).
- WU Zhong-hai. 2018. Active Faults: Terminology, Research Advances, and Thinking on Some Problems[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 40(06): 706-726(in Chinese with English abstract).
- XIE Guang-lin. 1989. *Atlas of Landsat Imagery of Main Active Fault Zones in China*[M]. Beijing: Seismological Press(in Chinese).
- XU Xi-wei, HAN Zhu-jun, YANG Xiao-ping, ZHANG Shi-min, YU Gui-hua, ZHOU Ben-gang, LI Feng, MA Bao-qi, CHEN Gui-hua, RAN Yong-kang. 2016. *The Seismotectonic Map of China and Its Vicinity*[M]. Beijing: Seismological Press & Sinomaps Press(in Chinese without English abstract).
- XU Xi-wei, WEN Xue-ze, HAN Zhu-jun, CHEN Gui-hua, LI Chuan-you, ZHENG Wen-jun, ZHANG Shi-min, REN Zhi-kun, XU Chong, TAN Xi-bin, WEI Zhan-yu, WANG Ming-ming, REN Jun-jie, HE Chong, LIANG Ming-jian. 2013. Lushan Ms7.0 earthquake: A blind reserve-fault event[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(28-29): 3437-3443.
- XU Xi-wei, YU Gui-hua, MA Wen-tao, RAN Yong-kang, CHEN Gui-hua, HAN Zhu-jun, ZHANG Lan-feng, YOU Hui-chuan. 2002. Evidence and methods for determining the safety distance from the potential earthquake surface rupture on active fault[J]. *Seismology and Geology*, 24(4): 470-483(in Chinese with English abstract).
- XU Xi-wei. 2006. Active faults, associated earthquake disaster distribution and policy for disaster reduction[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 1(1): 7-14(in Chinese with English abstract).
- XU Yu-jian. 1982. On active faults[G]//Committee on Seismogeology, The Seismological Society of China (ed)[G]//*The Active Faults in China*. Beijing: Seismological Press: 10-13(in Chinese).
- YEATS R, SIEH K, ALLEN C. 1997. *The Geology of Earthquakes*[M]. Oxford: Oxford University Press: 576.
- YEATS R. 2012. *Active faults of the world*[M]. Cambridge: Cambridge University Press: 621.
- YI Ming-chu. 2003. *Neotectonic Activity and Regional Crustal Stability*[M]. Beijing: Seismological Press(in Chinese).
- YOSHIOKA T, MIYAMOTO F. 2005. Active fault database of Japan: Gathering and spreading active fault data for earthquake risk management[OL/EB]. [2018-12-25]. http://riodb02.ibase.aist.go.jp/activefault/index_e.html.
- YOSHIOKA T, MIYAMOTO F. 2011. Active fault database of Japan: Its construction and search system[C]//AGU Fall Meeting. AGU Fall Meeting Abstracts.
- H.I.Nikolayev. 1965. *Neotectonic studies of the Soviet Union*[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- YU Bo-liang. 1957. Characteristics and significance of neotectonic movement in Gansu[C]//Department of Geology, Chinese Academy of Sciences. *Proceedings of the first symposium on neotectonic movement of the Chinese Academy of Sciences*. Beijing: Science Press: 119-126(in Chinese).