

文章编号: 1006-6616 (2016) 03-0379-33

长江经济带地区活动构造 与区域地壳稳定性基本特征

吴中海^{1,2}, 周春景^{1,2}, 谭成轩^{1,2}, 孙玉军^{1,2}, 马晓雪^{1,3}

(1. 中国地质科学院地质力学研究所新构造与活动构造研究室, 北京 100081;

2. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081;

3. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

摘要: 基于长江经济带地区活动断裂资料的收集整理和总结, 结合新的遥感解译与地表调查结果, 初步归纳了该区的活动构造基本特征, 梳理出直接或间接威胁重要城市群、国家级新区和区域重要交通江通道地壳稳定性的主要活动断裂及应对建议或对策, 并进一步重点指出长江中下游成都—上海沿江地区的 32 条重要活动断裂带及其穿越或影响到的主要城市群和重大工程。在活动断裂梳理结果基础上, 总结提出长江经济带西部的强烈地壳变形与地震活动主要由印度板块与欧亚板块碰撞作用下在青藏高原东南缘地区形成的“川滇弧形旋扭活动构造体系”所控制, 而中—东部地区属于印度板块与西太平洋板块共同作用下区域性挤压-剪切变形导致的具有共轭走滑断裂系统特征的“棋盘格子式”活动构造体系格局, 其中需要特别关注 7 条典型活动断裂带的活动性及其对城市群地壳稳定性的影响。根据区域的活动构造体系、活动断裂与历史地震活动性等特点, 初步归纳了该区的未来地震危险性问题和应重点关注的潜在强震危险区段, 指出了典型的区域古地震地质遗迹特征及开展古地震调查研究的重要性。同时, 依据长江经济带地区初步的区域地壳稳定性评价结果, 认为次不稳定区和不稳定区主要集中在西部地区, 而中—东部地区以次稳定区与相对稳定区为主, 仅郯庐断裂带及其周边存在较明显的次不稳定区。最后, 指出了长江经济带活动构造与区域地壳稳定性调查评价工作在活动断裂地质调查研究和城市活断层鉴别与地震危险性评价中面临的主要问题与挑战。

关键词: 长江经济带; 活动断裂与构造体系; 古地震; 地震危险性评价; 区域地壳稳定性

中图分类号: P546; P542

文献标识码: A

1 长江经济带地区活动构造概况

长江是中国独有的亚洲第一大河, 它发源于西藏、青海交界的唐古拉山北坡各拉丹冬雪

收稿日期: 2016-03-01

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (12120114002101, DD20160268)

作者简介: 吴中海 (1974-), 男, 博士, 研究员, 从事新构造与活动构造研究。E-mail: wzhh4488@sina.com

峰, 流经青海、西藏、四川、云南、重庆、湖北、湖南、江西、安徽、江苏、上海共 11 个省、自治区和直辖市, 横跨中国东、中、西三大区域, 全长约 6300 km, 其中宜宾以下长约 2800 km。长江通道是货运量位居全球内河第一的黄金水道, 也是中国国土空间开发最重要的东西轴线, 在区域发展总格局中具有重要战略地位。因此, 国家提出了依托该黄金水道建设覆盖上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南和贵州共 11 省市的长江经济带(见图 1)的重大经济发展战略。



图 1 长江经济带地理位置图

Fig. 1 The regional range and location of the Yangtze River Economic Belt

长江经济带面积约 $205 \times 10^4 \text{ km}^2$, 人口和生产总值均超过全国的 40%。“十三五”期间, 该区重点规划了 10 个重要城市群与经济区带, 自东向西分别为: 长三角城市群及其中的苏南现代化建设示范区和皖江经济带, 长江中游城市群及其中的武汉城市群、环鄱阳湖城市群和长株潭城市群, 以及成渝城市群、黔中城市群和滇中城市群。同时, 该经济带中在建和规划重要过江通道 95 个、内陆核电站 19 个, 并有沪汉蓉与沪昆高铁等多条骨干铁路及众多大型水电站等重大工程。本文在已有的中国活动构造数据^[1]基础上, 结合进一步的活动断裂遥感解译, 对长江经济带地区的已知主要活动断裂进行详细梳理分析后, 初步归纳出了直接或间接威胁重要城市群、国家级新区和区域重要交通过江通道地壳稳定性的主要活动断裂(见表 1), 结果表明, 存在许多直接或间接威胁长江经济带城市群、国家级新区和重要交通过江通道的区域性活动断裂(表中主要断裂及名称见图 2), 这些断裂究竟如何影响城镇和重大工程安全、影响方式和程度如何等问题都需要进一步深入调查与研究。由于长江经济带特殊的地质-生态环境和防灾减灾背景, 无论是城市群发展与新型城镇化建设, 还是重大工程的规划与设计, 都会不同程度地面临活动构造及区域地壳稳定性方面的问题。因此, 全面查明和掌握该区的活动构造特征及相关的区域地壳稳定性可为长江经济带的规划与建设提供重要的地质科技支撑。

本文基于已有成果资料的梳理, 结合笔者近年来在区域上开展活动断裂遥感解译与地表调查获得的新资料, 从活动构造体系和历史地震活动角度, 在宏观上对长江经济带地区的活动构造特征及地壳稳定性问题进行分析总结, 并提出相关认识, 以期对今后的调查与研究工作起到一定的指引作用。考虑到以川滇活动地块为主的长江经济带西部地区是中国西南著名的强震活动区, 前人对该区的活动断裂与地震地质情况研究较多, 并且笔者近期曾针对该区的新构造与活动构造研究组织出版相关成果专辑, 对该区的活动构造体系与区域地壳稳定性

等都有较全面的分析与总结^[2~4], 因此, 本文分析探讨的内容将更偏重于宜宾—重庆一线以东的长江经济带中、东部地区。

表 1 长江经济带地区直接或间接威胁重要城市群、国家级新区和主要过江通道等地壳稳定性的主要活动断裂及应对建议或对策一览表

Table 1 The main active faults probably directly and indirectly threat to regional crustal stability of the important urban agglomeration, national new districts and main river-crossing channels in the Yangtze River Economic Belt, and the main suggestions or countermeasures to the disaster prevention				
重要城市群和交通设施	具体地区	可能造成直接威胁的主要活动断裂	可能存在间接威胁的主要活动断裂	主要建议或对策
主要城市群	长三角	北东向右旋走滑断裂系统: 茅山断裂, 萧山-球川断裂, 江山-绍兴断裂, 丽水断裂带, 镇海-温州断裂带; 北西-北西西向左旋走滑断裂系统: 嘉山-南渡断裂, 巢湖-杭州断裂带, 昌化-普陀断裂, 无锡-苏州断裂带和南通-嘉定断裂带	郧庐断裂带西南段, 海域活动断裂	系统调查和定量评估直接影响北区的主要活动断裂的现今活动性、未来发震潜力和对地壳稳定性的影响, 尤其是规模相对大的北东向活动断裂, 同时需要评估间接影响活动断裂的远场影响问题
	长江中游	北东向右旋走滑断裂系统: 星子-靖安断裂, 赣江断裂带, 崇阳-宁乡断裂, 湘乡-邵东断裂, 沅江断裂, 澧水断裂, 大庸断裂, 恩施-咸丰断裂, 团风断裂; 北西-北西西向左旋走滑断裂系统: 襄樊-广济断裂, 竹山断裂, 钟祥断裂, 益阳-长沙断裂, 雾渡河断裂, 南漳断裂带和仙女山断裂	郧庐断裂带西南段, 信阳-金寨断裂, 贵阳-芷江-溆浦断裂	需重点调查和定量评估直接影响北区北部的北西西向和南部北东向活动断裂的活动性、未来发震潜力和对地壳稳定性的影响, 同时评估间接影响活动断裂的远场影响问题
	皖江经济带	北东向右旋走滑断裂系统: 郧庐断裂带宿迁-九江段, 江南断裂, 马鞍山-芜湖断裂, 葛功断裂, 霍山断裂; 北西-北西西向左旋走滑断裂系统: 巢湖-杭州断裂带, 信阳-金寨断裂带	—	重点调查评估规模最大的北东向郧庐断裂带的现今活动性、发震潜力和对地壳稳定性的影响, 同时注意北西向巢湖-杭州断裂带和信阳-金寨断裂带对地壳稳定性的影响
重要城市群和交通设施	成渝城市群	北东向右旋逆冲断裂系统: 芦山断裂, 新津-德阳断裂, 龙泉山断裂带; 北西向左旋走滑断裂系统: 峨边断裂, 天全-蒙经断裂	龙门山右旋逆冲断裂系 (包括灌县-安县断裂、映秀-北川断裂、平武-青川断裂和汶川-茂汶断裂), 恩施-咸丰断裂, 西河-美姑断裂, 三河口-烟峰断裂	重点调查评估规模最大、活动最为显著的龙门山断裂系的现今活动性、未来发震潜力和对地壳稳定性的影响。同时注意龙泉山断裂带的地壳稳定性影响
	黔中城市群	北东向右旋走滑断裂系统: 贵阳-芷江断裂带; 北西-北西西向左旋走滑断裂系统: 威宁-水城断裂带	北东向寻甸-来宾铺断裂带, 北西向的南丹-河池断裂带和百色-合浦断裂带	重点调查和定量评估规模最大的贵阳-芷江断裂带的现今活动性、未来发震潜力和对地壳稳定性的影响
	滇中城市群	近南北向左旋走滑断裂系统: 小江断裂带 (包括: 宜良断裂和嵩明断裂), 昆明-普渡河断裂, 易门断裂带和元谋-绿汁江断裂带; 北西向右旋走滑断裂系统: 红河断裂带沅江段, 曲江断裂带和楚雄-南华断裂带	北东向右旋走滑断裂带: 寻甸-来宾断裂带和弥勒-师宗断裂	重点调查评估规模最大且活动性最为显著的近南北向走滑断裂带的现今活动性、发震潜力和对地壳稳定性的影响。其次是北西向活动断裂的活动性及其地壳稳定影响问题
	苏南现代化建设示范区	北东向右旋走滑断裂系统: 茅山断裂, 金坛-南渡断裂; 北西-北西西向左旋走滑断裂系统: 嘉山-南渡断裂和无锡-苏州断裂带	北东向郧庐断裂带西南段和江南断裂带, 北西向的巢湖-杭州断裂带	进一步调查研究茅山断裂和嘉山-南渡断裂带的现今活动性、未来发震潜力和对地壳稳定性的影响

续表 1

重要城市群 和交通设施	具体 地区	可能造成直接威胁的 主要活动断裂	可能存在间接威胁的 主要活动断裂	主要建议 或对策
国家级新区	舟山群岛	昌化-普陀断裂带和镇海-温州断裂带	黄海海域断裂	需关注海域断裂活动的影响问题
	上海浦东	南通-嘉定断裂带	黄海海域断裂	需关注海域断裂活动的影响问题
	南京江北	无锡-宿迁断裂带和嘉山-南渡断裂带	茅山断裂带和金坛-南渡断裂带	重点是北西向无锡-宿迁断裂活动性的调查评估和金坛-南渡断裂的远场影响问题
	重庆两江	华蓥山断裂, 恩施-咸丰断裂	—	—
	成都天府	龙泉山断裂带, 新津-成都断裂	龙门山断裂带	重点加强对龙门山断裂带的远场影响和龙泉山断裂带活动性的调查研究
重要过江 通道	安徽省	北西向巢湖-杭州断裂带和北东向的马鞍山-芜湖断裂带	郟庐断裂带皖江段和嘉山-南渡断裂带	—
	湖北省	—	—	—
	江苏省	北西向的无锡-苏州断裂带、嘉山-南渡断裂带和南通-嘉定断裂带	—	—
	江西省	郟庐断裂带九江段	赣江断裂带和星子-靖安断裂带	应重点关注郟庐断裂带和赣江断裂带的活动性与地壳稳定性评价问题
	四川省	—	峨边断裂带	—
	重庆市	—	—	—

注: 表中横线表示由于对活动断裂情况调查研究程度不足或对断裂影响情况尚不清楚, 目前难以对活动断裂的影响或相关的地壳稳定性问题做出准确的评价或评估。

2 活动构造概况

2.1 活动构造基本概念与分区

活动构造一般被定义为“晚第四纪期间（主要是距今约 500 ka 或 150 ka 以来）仍在活动, 并在未来仍将活动的构造”^[5~6]。活动断裂作为活动构造的主要类型, 其定义与活动构造类似, 一般强调“晚第四纪期间（主要是距今约 150 ka 以来或晚更新世以来）多次活动, 并且未来仍将活动的断裂”^[6~8]。由于活动断裂的定义与地震危险性评价直接相关, 活动断裂调查研究的根本目的之一是确定断裂未来是否可能活动并引发地震灾害^[9]。对于中国东部、尤其是华南地区而言, 晚第四纪与第四纪、甚至新生代断裂的活动特征常具有明显的一致性和继承性^[10], 并且长江经济带中、东部地区晚第四纪期间的地壳活动性与断裂活动强度相对中国西部地区明显弱得多。因此, 探讨该区的活动构造问题, 仅考虑晚第四纪活动的断裂显然是不全面的, 需要着眼于第四纪, 乃至第三纪期间（特别是新近纪）具有明显活动的断裂及构造。

长江经济带从西到东穿过青藏高原东南缘、云贵高原和江南丘陵及其间的四川盆地、两湖平原、鄱阳湖平原和长江中下游平原等多个不同的地形地貌单元。大地构造上, 分别跨越了川滇藏造山系、扬子陆块区和武夷—云开—台湾造山系（又称华南造山带或褶皱带）共 3 大地质构造单元, 其中包含了众多演化历史不同的次级构造块体^[11~12]。因此, 该区不仅具有独特的地形地貌特点, 而且地质构造与断裂体系复杂。新构造期间（距今 10 ~ 8 Ma 以来）, 中国大陆在西南侧印度板块向北北东方向的低角度快速陆内俯冲作用和东侧西太平洋板块向西高角度快速俯冲作用的双重动力体系控制下, 古老的造山带和构造形迹纷纷复活, 导致了许多活动断裂的出现和复杂的活动构造体系的产生。长江经济带横贯中国大陆南部, 其现今地壳活动性在东、西两大不同动力体系的共同作用与影响下, 也不可避免地存在许多规模和活动性不等的活动断裂。长江经济带空间上大致以近南北向的成都—西昌—昆明一线

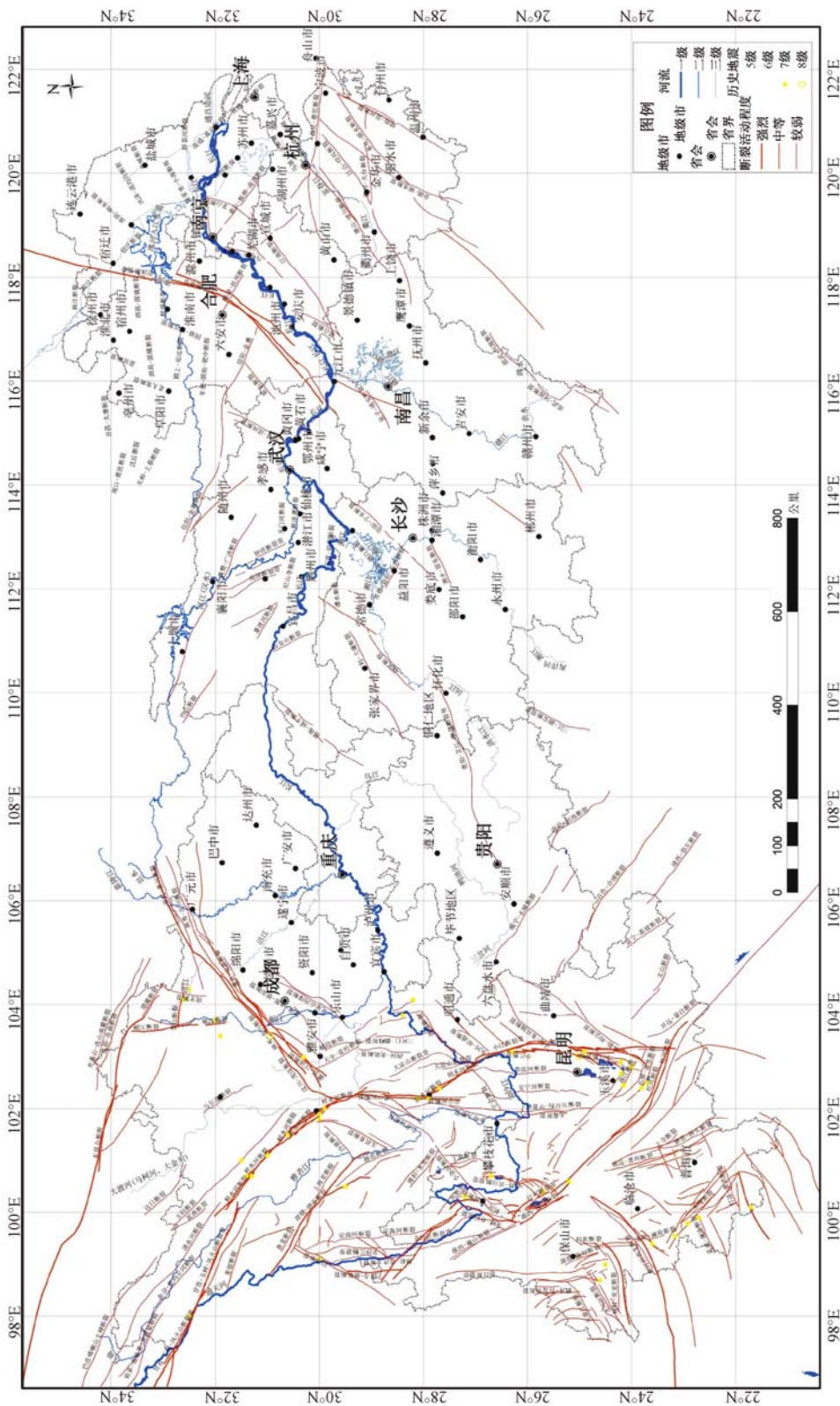


图2 长江经济带地区主要活动断裂分布图 (修编自文献 [1])
Fig.2 A distribution map of the main active faults in the Yangtze River Economic Belt

(大致对应南北地震的中南段)和北北东向的宿迁—合肥—九江一线(大致对应郯庐断裂带南段)为界,可分为西部、中部和东部3个区段(见图3)。西部隶属于青藏活动构造区,中、东部归为华南活动构造区。因此,不同区段的现今地壳活动性和动力学机制存在较明显差异。

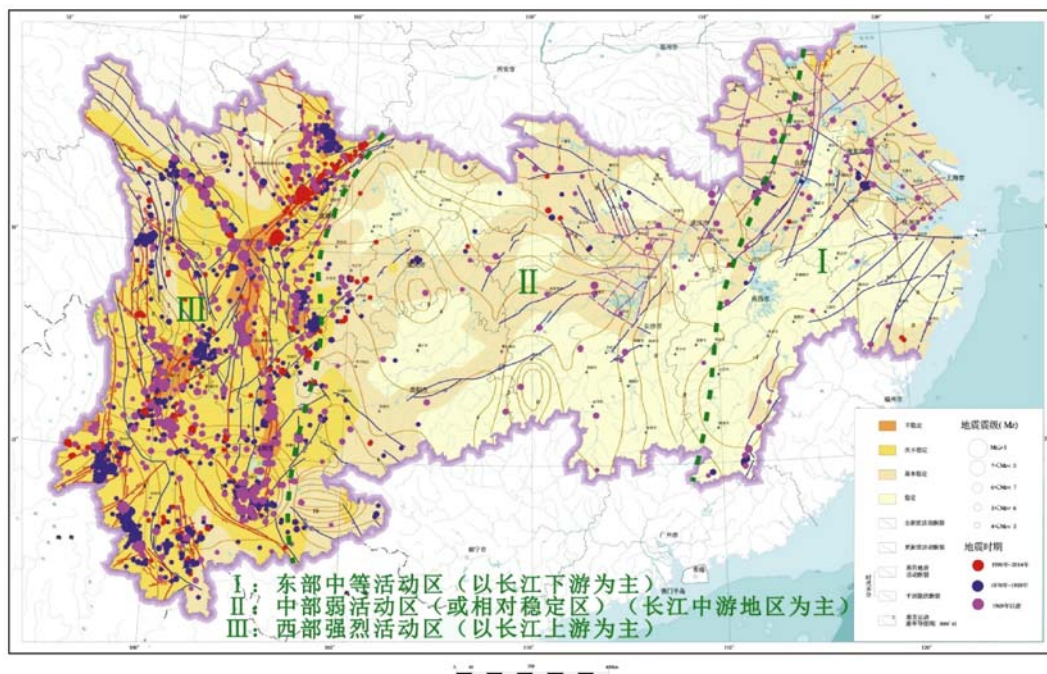


图3 长江经济带主要活动断裂与地震分布图(活动断裂据文献[1];地震数据源自中国地震台网)

Fig. 3 A distribution map of the main active faults and earthquakes in the Yangtze River Economic Belt

2.2 活动构造的东、西差异性

长江经济带西部处于青藏高原东南部、龙门山及云贵高原地区,主要包含青藏高原东缘现今构造活动最为强烈的川滇活动地块,其现今地壳活动主要受印度板块与欧亚板块间的陆陆碰撞作用控制。由于青藏高原内部物质的向东强烈挤出作用,形成了该区复杂而又特别活跃的地壳运动状态,现今的地壳构造应力场和地壳运动状态都以围绕东喜马拉雅构造结的顺时针旋转为特征,发育了龙门山构造带和鲜水河—小江断裂系等大型活动构造带,以及内部许多活动性中等、规模不等的活动断裂系统^[13~14]。其中活动性强烈的断裂主要集中在川滇地块边界,最大活动速率可以达到 $10 \sim 15 \text{ mm/a}$ ^[14~15],次级块体边界中以发育中等活动断裂为主,断裂活动速率多在 $0.5 \sim 2.0 \text{ mm/a}$ 左右^[3,16]。因此,该区既是中国活动断裂密度最大且地震活动频度最高的区域,也是地震地质灾害和地壳不稳定最显著区域。

长江经济带中、东部是新华夏构造体系中大型北东向沉降带与隆起带穿越区,现今地壳活动受到印度板块与欧亚板块碰撞和西太平洋板块向西俯冲作用的双重影响。该区主体属于相对稳定的华南活动构造区,并包含了次级的长江中下游断块区和川黔湘赣断块区等^[17]。震源机制解表明该区现今构造应力场以近东西向挤压为主^[18~22]。GPS观测显示,扬子地块相对于北部稳定的西伯利亚板块正以 $8 \sim 14 \text{ mm/a}$ 的速度向 $N130^\circ-150^\circ E$ 方向运动,且其内部的差异运动并不显著,也不存在特别明显的速度梯度带^[23~25]。前人^[7,26~28]在分析总结中国及长江经济带部分区域的活动断裂特征时指出,虽然整个华南地区整体上自晚第三纪以

来的断裂活动性较弱,但长江经济带中、东部地区第四纪期间存在较明显的断层活动与断块差异运动,主要发育北东向与北北东向、北西向与北西西向、近东西向多组规模和运动性质不同的晚第四纪活动断裂,典型的如:郟庐断裂带、襄樊—广济断裂带、漆河—太阳山断裂、梁子湖—商城断裂带、麻城—团风断裂、南渡—板桥断裂、茅山断裂和瑞金—会昌断裂等等,其中北东向与北北东向断裂的活动性相对更为显著。但该区除郟庐断裂带南延的宿迁—合肥—九江—长沙一线附近的断裂活动性和地震活动相对比较显著外,多数属低速率活动断裂,其活动速率一般都在 $0.5 \sim 1.0 \text{ mm/a}$ 以下。

长江经济带中、东部地区还存在规模不等和第四纪沉降幅度不同的断陷或拗陷盆地,主要包括江汉—洞庭、鄱阳湖、苏北和南黄海等盆地^[7,10]。这些盆地都是受北东—北北东、北东东向和北西—北西西向多组断裂控制,自白垩纪以来逐步发展起来的复杂断陷盆地。其中江汉—洞庭湖盆地主要充填的是白垩纪—古近纪地层,江汉盆地古近纪沉降幅度达 4000 m ,新近纪和第四纪地层厚度相对较薄,分别为 800 m 和 150 m 。洞庭盆地白垩纪—第三纪地层最大厚度可达 3000 m 左右,西南侧靠近太阳山断裂的区域第四系最大沉积厚度达 250 m 。苏北盆地主要受北东向正断层控制,白垩纪以来的沉积厚度达 $5000 \sim 6000 \text{ m}$,其中新近系厚 $700 \sim 1100 \text{ m}$,第四纪地层最厚超过 300 m ,北东向的淮阴—响水断裂(又称响水河断裂)是该盆地北部较为显著的控盆断裂^[10]。分布于上述盆地周缘的断裂往往是区域上第四纪活动性比较显著的断裂,典型的如江汉—洞庭盆地西部的北东向右旋走滑为主的太阳山断裂和东部的北北东向麻城—团风断裂与沙湖—湘阴断裂,以及分别从该盆地北界和南界穿过的北西西向的襄樊—广济断裂带与常德—益阳—长沙断裂等。另外,从该盆地西北侧山地中延伸入盆地的北北西向左旋走滑为主的雾渡河断裂、远安断裂、南漳断裂和钟祥断裂等都具有一定的活动性^[7]。在苏北盆地区,活动断裂以北东向具有正断成分的右旋走滑断裂为主,向东至南黄海地区,主要活动断裂转为以具有走滑成分的正断层活动为主的近东西向为主^[7]。

整体而言,相对于长江经济带西部,中、东部地区的新构造变形不甚强烈,断裂活动性也相对较弱。此外,由于大地构造背景和所处现今板块位置的不同,从历史地震活动性和活动断裂发育方面看,长江经济带中部与东部的现今构造活动性也存在一定差异,东部活动性较中部更为显著。这主要是由于中部的大部分属完整性较好和相对刚性的扬子陆块,并且处于中国大陆东、西两大板块作用力明显衰减的区域,而东部的主体属于块体完整性较差的华南造山带并靠近西太平洋板块边界带的缘故。

3 活动构造体系格局

长江经济带西部的川滇地区与长江经济带中、东部地区所处的新构造部位不同。西部主要受印度板块与欧亚板块强烈陆陆碰撞过程的控制和影响,现今处于青藏高原活动造山带的东南缘,地壳变形与地震活动强烈;而长江经济带中、东部地区所在区域处于中国大陆东、西两大板块边界的共同影响区,但因为距离板块边界较远,加上块体本身的刚性较强,现今地壳变形与地震活动性整体上都较弱。这种不同的板块边界条件导致两个区域的活动构造体系格局存在明显差异。

3.1 川滇地区的“弧形旋扭活动构造体系”格局

笔者在系统整理与分析前人对川滇地块及邻区活动断裂调查研究成果资料的基础上,结合2005年以来围绕该区滇藏铁路与大瑞铁路等重大工程沿线开展的活动断裂调查及西南地

区活动构造体系综合研究工作^[2-3,29],并进一步通过活动断裂遥感解译,详细梳理了川滇及邻区主要活动断裂的分布及其几何学与运动学特征。在此基础上,对断裂活动级别与组合方式进行划分,共梳理出主要活动断裂带 79 条,并将其归并为 9 个主要活动构造区带^[3]。

一级活动构造边界带 2 个,包括:

①长度超过 1400 km、整体呈近南北向展布的右旋走滑断裂系——实皆断裂系;

②总长度在 1800 km 左右、走向自西北向东南由北西西—北西—近南北向逐渐转变、整体呈凸向北东的弧形的左旋走滑变形带——玉树—鲜水河—小江断裂系。

二级活动构造区带 3 个,分别是:

①总长度在 1400 km 左右、走向自西北向东南由北西西—北西—近南北向逐渐转变、整体呈凸向北东的弧形展布的左旋走滑张扭变形带——理塘—大理—瑞丽断裂系;

②总长度约 280 km、整体呈北西走向的右旋走滑张扭变形带——耿马—景洪断裂系;

③总跨度 560 km 左右,由一系列走向北东—北东东的弧形左旋走滑断裂带沿北西方向近平行排列构成的剪切变形区——中缅老边界“梳齿状”旋扭构造变形区。

三级活动构造区带 3 个,分别为:大姚—楚雄张扭裂陷区、腾冲直扭构造变形区和思茅“帚状”旋扭构造变形区。

另外,区域上发育的少数相对独立的和组合关系尚不清楚的活动断裂,被归为“其他主要的块体内部活动断裂”。

上述不同级别构造区带控制下的川滇及邻区上新世以来及晚第四纪期间主要表现为基于川滇块体整体围绕东喜马拉雅构造结发生顺时针旋转的地壳运动特征,笔者将这一独特的活动构造格局归纳为“川滇弧型旋扭活动构造体系”^[2-3],其定义是“由弧形玉树—鲜水河—小江—奠边府断裂系和近南北向实皆右旋走滑断裂系所夹持的以川滇地区为主体的弧形断块区以及其中以旋转、剪切和伸展变形为主的活动区带所共同组成的活动构造系统”。该构造体系的主体主要受控于 2 条一级构造边界带(实皆断裂系和玉树—鲜水河—小江—奠边府弧形断裂系)和 1 条二级构造带(理塘—大理—瑞丽弧形构造带)。这 3 条大型的边界构造带将该活动构造体系分隔为内、外两部分,即川滇外弧带和滇西内弧带。这一构造体系格局明显控制或影响了川滇及邻区的强震活动性^[3]。长江经济带云南与四川西南大部分地区都处于这一活动性强烈的构造系统中,其历史地震活动具有频率高、强度大的特点,最大地震是 1833 年的云南嵩明 8 级大地震,造成 6700 余人死亡。

3.2 长江经济带中、东部地区的“棋盘格式活动构造体系”格局

对目前已知的活动断裂数据^[1]进行梳理,结合进一步的遥感解译和地质资料分析,并基于 3 个基本原则:①构成主要断块边界或在区域活动构造体系中起着重要作用;②历史上发生过 $M > 5.0$ 的破坏性地震;③地形地貌上有相对显著的表现或控制区域上主要第四纪断陷或拗陷盆地的边界;可从长江经济带中、东部的 86 条主要活动断裂带中进一步沿成都—上海沿江地区筛选出 32 条活动性相对更为显著的活动断裂(见图 4,表 2)。需要说明的是,考虑到郯庐断裂带目前是区域上被熟知的重要活动断裂,并且近年来积累的研究成果与资料很多,因此这里重点分析探讨的是除其之外的其他断裂带。

根据该区主要活动断裂在空间展布上的相关性,可将 32 条主要活动断裂从区域上归纳为主要呈北东—北北东纵向展布和北西—北西西向横向展布的“7 纵 7 横”共 14 组区域性构造带(见图 4)。这 14 组构造带宏观上明显构成了地质力学构造体系中典型的“棋盘格式构造体系”^[30],又称网状构造或 X 型断裂体系。两组断裂具有共轭走滑断裂体系特征,其

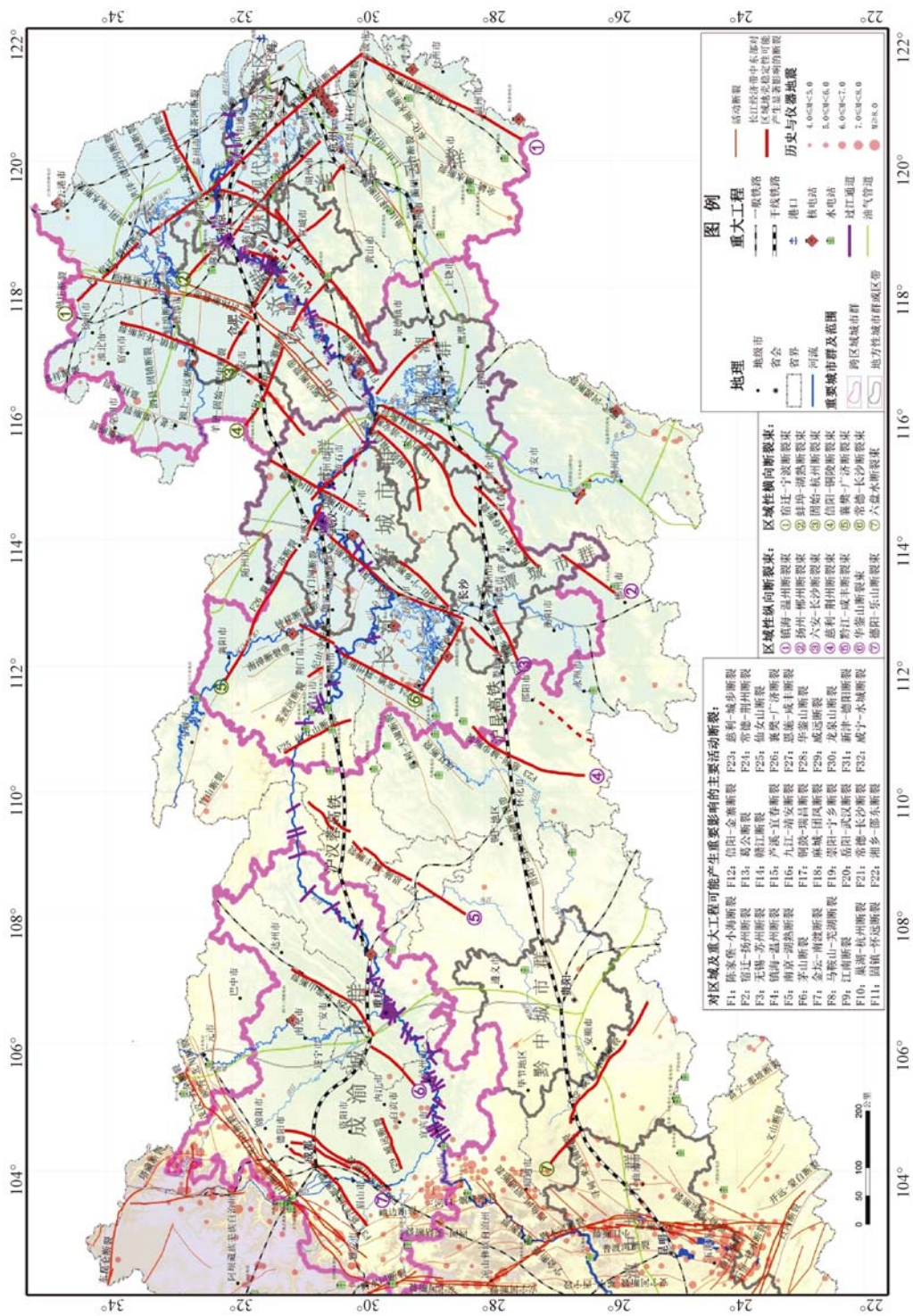


图4 长江经济带中、东部地区的主要活动断裂及重要城市群与重大工程分布图
Fig.4 A distribution map of the main active faults, important urban agglomeration and major projects in the central-eastern Yangtze River Economic Belt

表2 长江经济带中、东部成都—上海沿江地区的32条主要活动断裂带及其可能影响到的重要城市群或重大工程一览表

Table 2 The 32 important active faults and the important urban agglomerations and major projects being influenced by the faults along the Chengdu-Shanghai region of the central-east Yangtze River Economic Belt

断裂带名称	断裂名称	长度/km	走向	运动性质	穿越或影响的重要城市群或重大工程
镇海-温州断裂带	镇海-温州断裂	270	NE	左旋走滑	长江三角洲城市群、浙江三门核电站
嘉兴-徐州 北西向构造带	宿迁-扬州断裂	300	NW	左旋走滑	京杭运河、过江通道常泰段
	无锡-苏州断裂	455	NW	左旋走滑	苏南现代化建设示范区、沪蓉铁路、浙江泰山核电站
	南京-南渡断裂	325	NW	左旋走滑	苏南现代化建设示范区、沪蓉铁路、宜兴抽水蓄能电站、琅琊山抽水蓄能电站、沙河抽水蓄能电站
新余-九江-扬州 北东向构造带	茅山断裂	97	NE	右旋走滑	苏南现代化建设示范区、沪蓉铁路、过江通道五峰山段
	马鞍山-芜湖断裂	65	NNE	右旋走滑	皖江经济带、苏南现代化建设示范区、安徽芜湖核电站
	陈家堡-小海断裂	130	NE	右旋走滑	长江三角洲城市群
	金坛-南渡断裂	50	NNE	右旋走滑	苏南现代化建设示范区、过江通道张靖段
	江南断裂	260	NE	右旋断层	皖江经济带、陈村水电站
	葛公断裂	227	NNE	左旋走滑	皖江经济带、江西彭泽核电站、安徽吉阳核电站
	九江-靖安断裂	150	NNE	右旋走滑	环潘阳湖城市群、沪昆铁路、柘林水电站，长江护江大堤
	铜鼓-武宁-瑞昌断裂	100	NE	右旋走滑	长江中游城市群、长江护江大堤
	赣江断裂	227	NE	右旋走滑	环潘阳湖城市群、沪昆铁路、江西彭泽核电站
信阳-杭州 北西向构造带	芦溪-宜春断裂	97	NE	右旋走滑	沪昆铁路
	巢湖-杭州断裂	65	NW	左旋走滑	皖江经济带、沪蓉铁路
	信阳-金寨断裂	260	NW	左旋走滑	皖江经济带、沪蓉铁路、响洪甸抽水蓄能电站
岳阳-武汉 北东向构造带	固镇-怀远断裂	357	NE	右旋走滑	武汉城市群、皖江经济带、沪蓉铁路
	麻城-团风断裂	227	NE	右旋走滑	武汉城市群、沪蓉铁路
	岳阳-武汉断裂带	390	NE	右旋走滑	长江中游城市群、沪蓉铁路、沪昆铁路、湖南桃花江核电站、湖南小墨山核电站、湖北大畈核电站
	崇阳-宁乡断裂	130	NE	右旋走滑	长江中游城市群
	湘乡-邵东断裂	97	NE	正断层	长株潭城市群
襄樊-广济断裂带	襄樊-广济断裂	650	NW	左旋走滑	武汉城市群、环潘阳湖城市群、沪蓉铁路、沪昆铁路、湖北丹江口水电站
常德-荆州 北东向构造带	常德-荆州断裂	260	NE	右旋走滑	长江中游城市群、沪蓉铁路、长江-汉水护江大堤
	慈利-城步断裂	195	NE	右旋走滑	长江中游城市群、沪昆铁路
雅安-自贡逆冲 褶皱构造带	威远断裂	97	NEE	逆冲断层	成渝城市群
	龙泉山断裂	195	NE	逆冲断层	成渝城市群、沪蓉铁路
	新津-德阳断裂	97	NE	逆冲断层	成渝城市群、沪蓉铁路
其他断裂带	常德-长沙断裂带	240	NW	左旋走滑	长江中游城市群、湖南桃花江核电站
	仙女山断裂	97	NW	右旋断层	沪蓉铁路、隔水岩水电站、三峡大坝
	恩施-咸丰断裂	292	NE	右旋走滑	沪蓉铁路
	华蓥山断裂	292	NE	右旋走滑	成渝城市群、沪蓉铁路、四川三坝核电站、过江通道绵遂内宜铁路及白塔山段
	威宁-水城断裂	292	NW	走滑断层	黔中城市群、沪昆铁路

注：表中粗体标示了下一步工作中计划列为重点调查对象的13条对区域地壳稳定性可能产生重要影响的活动断裂（位置见图4）

活动方式以扭性为主，但可以伴有压型或张性成分。根据该区现今近东西向挤压的构造应力场背景可知，其中的北东—北北东向活动断裂主要以右旋走滑活动为主，而北西—北西向断裂多从左旋走滑活动为主。这一构造格局还影响着长江干流的走向，最为明显的是长江从宜昌出三峡后向东流动过程中出现了独特的“东南—东北—东南”的“W”型反复转折现象，这是长江主河道形成过程迁就利用了“棋盘格式构造体系”中的北西向和北东向两组构造带的表现。

前人认为长江经济带中、东部地区的“棋盘格式构造”可能是正在发展的地壳最新断裂系统——近代地壳破裂网格,其最主要的表现是现今地震活动常呈现出沿北西向和北东向分布的、比较规则的网格状或共轭状分布,并被认为是受到了相应的两组构造线的控制,其中两组构造线交汇的部位或附近往往是强震更易发生的位置^[31-32]。在长江经济带中、东部地区,最为明显的地震活动带或构造线是北西向的武汉—九江带与菏泽—扬州带以及北东向的临沂—潢川带与南京—铜陵带^[31],前者实际上大致对应于区域上的襄樊—广济断裂带和无锡—宿迁断裂带,而后者应该与郟庐断裂带和皖江断裂或江南断裂带相关,因此笔者认为该区的“棋盘格式断裂体系”格局,应该是老构造形迹在新的构造应力场作用下的重新活动。也正是由于燕山运动所形成的中国东部巨型北东向构造格局的显著影响,该区内的北东—北北东向构造的规模明显更大,连续性更好,活动性也更为显著,而多数北西—北西西向断裂的规模、连续性和活动性等都相对较差,只有襄樊—广济断裂和无锡—宿迁断裂可能是例外。现今的板块边界条件也决定了区域上早期的北东—北北东向构造更容易重新活动,因为目前影响长江经济带中下游区域构造应力场环境的主要是西部印度板块低角度向北俯冲与欧亚板块发生陆陆碰撞后导致青藏高原物质向东挤出对扬子板块施加的近东西向挤压作用和东部西太平洋板块向西高角度俯冲对中国东部施加的近水平挤压力,或许还有深部物质上涌造成的垂向力。另外,印度板块与华南块体之间还存在近南北向的右旋剪切作用。上述多种作用力的叠加,显然是有利于区域上北东—北北东向构造发生右旋走滑运动的。两组断层发育程度不同的棋盘格式构造属于简单剪切型,很可能与印度板块与华南地块之间存在区域性的右旋剪切作用有关。

4 长江经济带中、东部地区的典型活动断裂

长江经济带中、东部地区发育多组不同走向的活动断裂,但其中以北东—北北东向和北西—北西西向两组大致呈共轭关系的活动断裂带为主。在综合前人资料基础上,进一步结合遥感解译和区域地震活动资料发现,沿长江经济带中、东部地区,有7条未来可能存在较显著发震潜能的区域性活动断裂带需引起特别注意(见图5,图6)。

4.1 活动性较为显著的北东向断裂

笔者综合前人资料和遥感影像特征认为,区域上比较典型的穿越重要城市圈、活动性较为显著且对区域地壳稳定性可能具有显著影响的北东向断裂主要分布在渝东—鄂西山地、江汉—洞庭湖盆地周边和皖江河谷等区域。

4.1.1 渝东—鄂西山地的主要活动断裂

渝东—鄂西山地最显著且最具代表性的活动断裂是黔江—建始断裂带(又称黔江断裂或恩施—咸丰断裂)。该断裂是发育在川东—鄂西北燕山运动早期褶皱带中的北东向左旋走滑断裂带,自北向南主要包括了恩施断裂、彭水断裂和黔江断裂3条次级断裂(见图5a)。这3条次级断裂在遥感图上的线性影像特征比较显著,并且在后两条断裂之间,1856年曾发生黔江6¼级地震,并诱发小南海地震大滑坡。由于该断裂的西北侧向斜核部多分布近水平夹软弱岩层的厚层灰岩地层,并且岩层中的垂向节理或破裂较发育,而黔江支流横切该地层时多形成深切峡谷地貌,这样在支流水系溯源侵蚀该套地层过程中极易导致软弱层上部的厚层灰岩地层失稳发生大型的崩塌与滑坡灾害(见图5b)。在此复杂的山地环境与特殊的岩土体特性条件下,该区断裂活动性一旦发生中—强地震活动,显然会引发严重的地壳稳定性

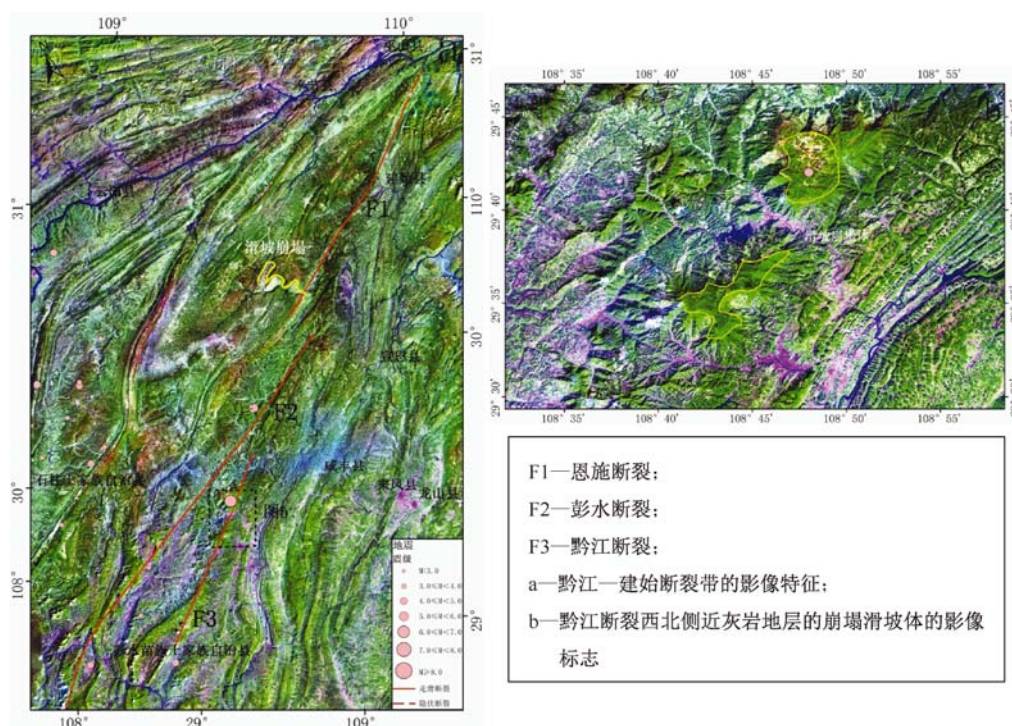


图5 黔江—建始断裂带及其北西侧山地的典型崩塌滑坡遥感影像特征

Fig. 5 The remote sensing image features of the Qianjiang-Jianshi fault zone and the typical collapses and landslides influenced by active faulting

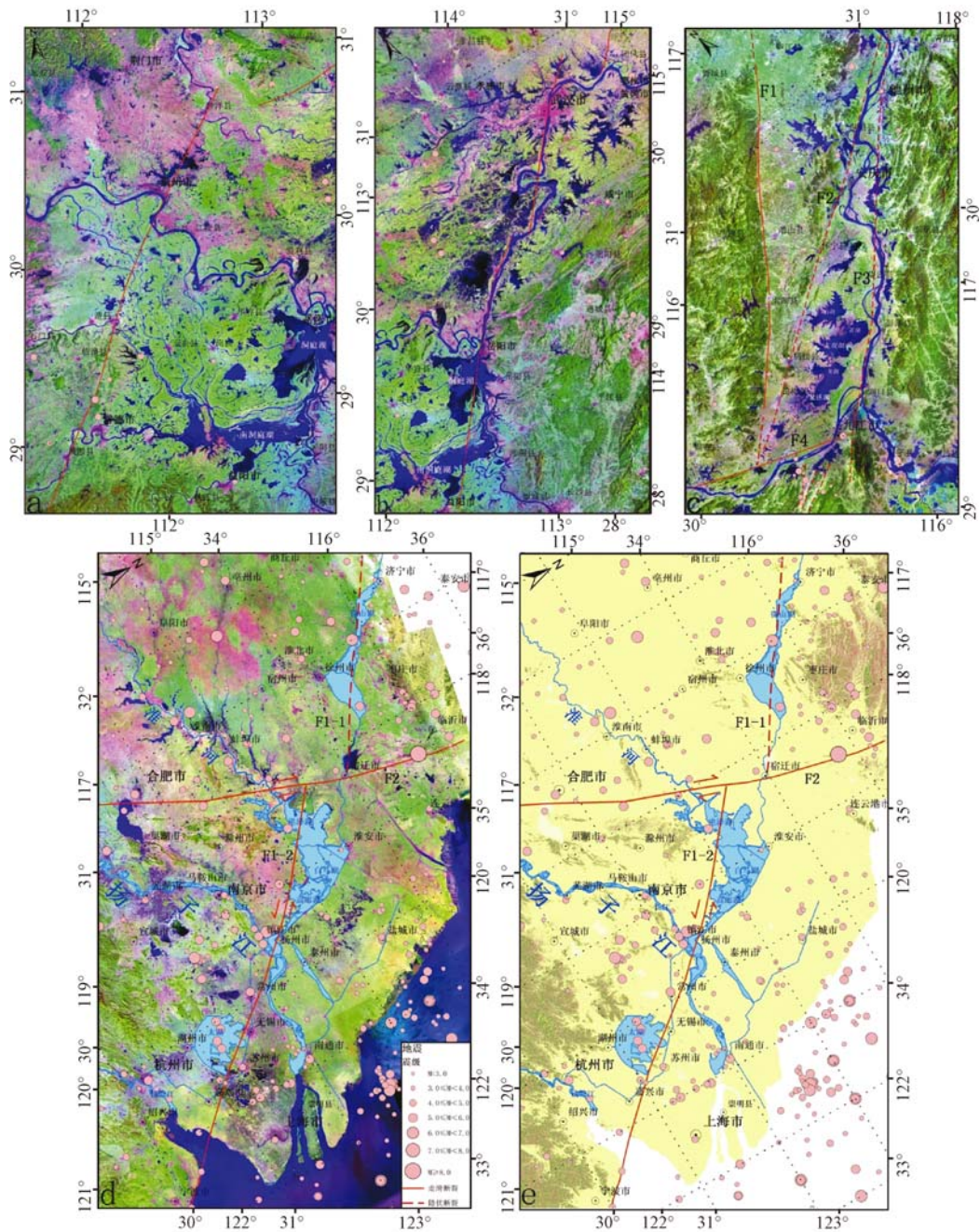
问题。因此,类似区域在进行城镇规划与重大工程建设时,需要考虑的不仅仅是断裂活动性或避让活动断裂的问题,还需要重点分析解决断裂活动可能进一步加剧区域斜坡不稳定并引发特大型或大型地质灾害的问题,即“类似的不稳定斜坡叠加区域断裂活动的不稳定区还有多少以及如何规避风险”的问题。

4.1.2 江汉—洞庭盆地的主要活动断裂

江汉—洞庭盆地及周边地区属于长江中游城市群的核心区域,是长江经济带中部地区人口最为密集和经济相对发达的区域。根据地质-地貌和遥感图像资料可以发现,该区第四纪活动迹象最显著的断裂非该盆地两侧的边界断裂带莫属,即属于西侧边界构造带的常德—荆州断裂带和构成东侧边界的岳阳—武汉断裂带。

4.1.2.1 常德—荆州断裂带

常德—荆州断裂带整体呈 $N40^{\circ}E$ 走向,其南端从湖南省境内沅江的桃源段南部向东北沿前人所称的“太阳山断裂”过津市市、湖北的公安县、荆州市和沙阳县后,右阶至天门至安陆一线,北端被截于北西向的襄樊—广济断裂带,全长约 430 km。该断裂带是在综合前人资料基础上结合遥感解译重新厘定的区域性断裂,其最显著的活动标志是沿断裂从北到南的汉江、长江、澧水和沅江等多个大江大河的同步弯曲现象(见图 6a),以及江汉—洞庭湖盆地第四纪地层厚度在断裂两侧存在显著变化,断裂东侧沉积厚度显著大于断裂西侧。该断裂在空间上具有较明显的分段性,其中津市市至桃源县一带的南段包含了常德一带的“太阳山断裂”部分,主要分布于洞庭湖盆地西南部的丘陵地区;而津市市至沙阳县间的中段,隐伏于北东向的洞庭湖—江汉盆地西部,应属于该盆地西部边界断裂带的一部分;天门



a—常德-荆州断裂及其上水系偏转的遥感标志；b—岳阳-武汉断裂带及其影响长江河道展布的遥感特征；c—皖江河谷中主要活动断裂的遥感影像（F₁：庐江断裂带南段；F₂：安庆断裂带；F₃：皖江断裂带；F₄：襄樊-广济断裂带）；d—无锡-宿迁断裂带上湖泊呈线性展布的遥感影像特征（F₁₋₁：无锡-宿迁断裂带山东聊城至江苏宿迁段；F₁₋₂：无锡-宿迁断裂带洪泽湖至杭州湾段；F₂：庐江断裂带）；e—无锡-宿迁断裂带两侧地形差异的DEM影像特征（断层编号同图6d）

图6 长江经济带中、东部地区典型活动断裂及其遥感影像特征

Fig. 6 Typical active faults in the central-eastern Yangtze River Economic Belt and their remote sensing image features

至安陆间的北段与中段构成了右阶斜列关系,并构成了江汉盆地北部的西侧边界,该段断层两侧的地貌差异明显,西部为以基岩出露为主的低起伏的低山丘陵区,而东部为厚层晚新生代沉积构成的平原区。其中沿“太阳山断裂”曾发生江汉—洞庭湖地区历史记载的最大地震——1631年常德 $6\frac{3}{4}$ 级地震。该地震的极震区烈度达到IX度,地震不仅造成较为严重的人员伤亡和房屋倒塌,而且在常德、澧县、安乡和大庸等多地出现地裂沙涌以及山崩河淤等地震次生灾害现象。综合该断裂的整体规模和较显著的地貌特征以及南段曾发生的历史强震活动等证据,推断其应该具有发生6.5级及以上地震的潜能。由于沿该断裂带不仅有常德、荆州、天门等多个人口密集的中等城市,而且还有护江大堤以及规划的内陆核电站等,因此,需要重视历史上尚未发生过强震的中段和北段的未来强震危险性问题。

4.1.2.2 岳阳—武汉断裂带

岳阳—武汉断裂带从湖南宁乡附近经岳阳和武汉西部延至麻城北,整体呈 $N30^{\circ}-35^{\circ}E$ 走向,全长约450 km,构成了江汉—洞庭盆地的东部边界断裂,包含了呈右阶斜列分布的南、北两段。南段对应前人所称的沙湖—湘阴断裂(又称湘江断裂)^[27],即从湖南省宁乡县西南向北东大致沿湘江和洞庭湖东界过岳阳后,顺长江过武汉市西侧北延至黄陂区东部的武湖北部的段落,长360 km左右。该段构成了洞庭湖的东侧线性边界,并且其遥感影像特征比较显著,影响或控制了长江岳阳至武汉段沿北东向的流向(见图6b)。该断裂带的北段是前人所称的麻城—团风断裂^[33],其从湖北麻城县西的涨渡湖附近向北东大致顺举水河过新洲区和麻城市后一直延伸至大别山腹地,长约130 km。在该断裂带北段的麻城—团风断裂附近,历史上曾多次发生4~6级中强地震活动,最大地震是1932年湖北麻城黄土岗6级地震,极震区烈度达到VIII度,等震线的长轴走向NNE,与麻城—团风断裂走向基本一致。沿南段的沙湖—湘阴断裂,历史最大地震记录是1556年湖南岳阳5级地震,极震区烈度VII度。由于该断裂南段的规模更大,地貌特征也十分显著,显然具有发生更大级别地震的潜力。考虑到该断裂穿越了长江中游城市群中的多个人口密集的重要城市,因此,需更深入地了解 and 掌握该断裂带的第四纪活动性与潜在地震危险性。

4.1.3 皖江河谷的主要活动断裂带

江西九江至安徽芜湖之间的长江皖江河谷段是在古近纪断陷盆地的基础上继承发展而成的具有“两凹夹一隆”地貌格局的北东向宽阔谷地(见图6c)。该区是皖江经济带的核心区域和城镇及人口密集区,同时也是活动断裂比较发育的区域。综合前人资料和遥感解译结果可知,该区自西向东主要展布3条比较显著的北北东—北东向断裂带,分别为鄱庐断裂带南段、安庆断裂带和皖江断裂带,多条断裂从皖江河谷中穿过同时导致了该区地震活动在河谷呈分散状分布的特点(见图6c)。

4.1.3.1 鄱庐断裂带南段(宿迁—肥东—黄梅段)

鄱庐断裂带整体呈北北东走向,北端位于鄂霍茨克海西南缘附近,向西南穿过俄罗斯的哈巴罗夫斯克边疆区和犹太自治州后,在黑龙江省鹤岗市萝北县北部一带开始进入中国境内,并依次穿过黑龙江、吉林、辽宁、渤海湾、山东、江苏、安徽和湖北,其南段在湖北省的武穴市(原广济县)附近与北西向的襄樊—广济断裂交汇,全长约3300 km,中国境内长约2400 km。该断裂带切穿中国东部不同大地构造单元,规模宏伟,结构复杂,是中国大陆切割岩石圈尺度的规模最大、穿越省份且影响人口最多的巨型右旋走滑活动断裂带,也是东部滨太平洋活动构造域与西侧的中国大陆中部活动构造域之间的分界断裂带。鄱庐断裂带也是中国东部最为著名的地震断层带,沿其山东段曾发生我国东部大陆内部一次最强烈的地震

——1668年郯城8.5级大地震,宏观震中位于山东省郯城、临沭与临沂交界(今临沂市河东区梅埠镇干沟洲村附近),极震区烈度达Ⅺ度。地震共造成5万余人死亡,遭受地震破坏的县多达150余个。研究发现,该地震断层段的全新世右旋走滑速率达 $1.7 \sim 2.8 \text{ mm/a}$,垂直位移速率在 $0.2 \sim 0.5 \text{ mm/a}$ 范围内^[34]。

郯庐断裂带山东以南的段落可视为其南段,呈北北东—北东走向,穿过了江苏、安徽和湖北3省,从北部的新沂向南经宿迁、泗洪、肥东、庐江、黄梅至武穴一带,长约580 km。其中江苏段从新沂向南经宿迁、泗洪至双沟镇附近,呈北北东走向,长约145 km;安徽段呈北北东—北东走向,从明光市北向南经肥东县东、庐江县西、桐城市、潜山县、太湖县至宿松县北西,长约370 km;湖北段呈北东走向,沿皖江河谷西侧山前从黄梅县停前镇的北东向西南至长江北岸的武穴市,长约65 km。安徽—湖北段在过庐江西后,主要沿皖江河谷西侧的山前地带分布(见图6c),该段除了右旋走滑作用,应有较明显的倾滑分量,并造成了西侧山地的隆升和东侧谷地的沉降,从而形成皖江河谷段比较显著的盆山地貌。

整体上看,郯庐断裂带山东—江苏段因受到1668年大地震的影响较大,该段的研究程度相对较高,尤其是江苏宿迁段,近年来围绕该区的地震危险性问题,相继开展了城市活断层探测以及1:50000与1:250000多尺度的活动断裂探测等工作,但对于穿过皖江经济带的安徽—湖北段的研究程度总体较低。虽然部分研究认为,郯庐断裂带南段的最新活动是中更新世末,而尚未发现错断 Q_3 及 Q_4 地层的直接依据,可能表明其晚更新世—全新世的活动强度有限^[35~38]。但该段上发现的多期史前地震遗迹及现今地震活动特征^[39~41]指示,其未来的地震危险性不容忽视。因此,从皖江经济带的未来长远发展以及其中的内陆核电站规划等需求角度,郯庐断裂带南段的断裂活动性与相关的地壳稳定性及地震危险性等方面的调查研究工作都值得进一步加强。

4.1.3.2 安庆断裂带

安庆断裂带又称沿江断裂,大致顺皖江河谷中铜陵—宿松一线的长江西侧主要由奥陶纪至早白垩世沉积地层和燕山期岩体构成的低山丘陵的东南边界分布,走向北东。其西南段在湖北武穴市附近,向东北方向依次经黄梅、宿松、安庆和枞阳等地后延至芜湖附近与皖江断裂带相交(见图6c),长约310 km。该断裂带具有较明显的线性影像特征,不仅构成了北东向低山丘陵地貌单元的东南侧边界,沿安庆至石碑镇段还可见较明显的断层三角面地貌,并且在武穴至石碑镇段,断层东南侧自西南向北东依次分布龙感湖、大官湖、泊湖和武昌湖等线性的积水洼地,这些特征都指示该断裂在第四纪期间可能存在活动性。安庆断裂带区域上与西侧的郯庐断裂带和东侧皖江断裂带呈小角度斜接,构成了较为明显的“入”字型断裂组合形态,按照Reid剪切模式,其可看作是由郯庐断裂带与皖江断裂带共同构成的右旋剪切带中的R剪切面。

4.1.3.3 皖江断裂带

皖江断裂带是根据遥感影像特征新识别出的一条北北东向断裂带,其从九江附近向北东方向大致沿湖口、彭泽、池州、铜陵一线的长江下游皖江段延伸至芜湖附近(见图6c),长约300 km。该断裂带在遥感影像上的线性特征比较明显,长江的皖江段也明显顺该断裂带展布,沿断裂还可见一些3~5级左右的地震分布,从该区地震的震源机制解结果判断,其应该属于一条存在一定第四纪活动性的右旋走滑断层。区域上,该断裂带向西南与江西省境内的星子—靖安断裂相接,后者构成了鄱阳湖盆地的西北侧边界,整个断裂带则与郯庐断裂带南段构成了左阶斜列关系,因此其也可能属于郯庐断裂带南段的分支断裂。

4.2 需要关注的北西向活动断裂带

4.2.1 中国东部的北西向断裂带对地震分布具有较明显的控制作用

由于燕山期构造运动对中国大陆东部构造格局的强烈改造和影响,形成了中国东部极为突出的以北东、北北东向断裂或构造带为主构成的华夏系和新华夏系构造系统及地貌特征,并且这一构造格局仍深入影响着新生代主要构造形迹的展布特征。但随着新构造、活动构造和地震地质研究的不断深入,前人根据地震活动的空间分布特征及规律,以及一些典型强震活动,如1975年海城地震和1976年唐山地震等发生时的地质构造背景发现,区域性的北西向断裂对中国东部的地震孕育和发生可能存在重要影响,提出应重视对中国东部地区北西向和北北西向活动断裂的研究^[42]。丁国瑜等^[31]对地震活动、地质构造、地貌和卫星影像等进行分析后认为,中国东部存在由北东和北西向两组弹塑性破裂组成的地壳现代破裂网络,而两组断裂交汇部位通常是区域强震活动场所。徐杰等^[43]根据地震构造、新构造和火山活动等资料并结合Pn波速结构研究结果,发现中国大陆东部新构造期的北西向活动断裂具有成带性特征,主要可分为7条比较显著的北西向地震构造带或断裂带,其中穿过长江经济带地区的主要北西向构造是介休—新乡—溧阳断裂带的东段、巴东—泉州—台湾和六盘水—海口断裂带的西段。前人指出,这些区域性北西向构造带均为地壳构造带,具有明显的新生性,并且与区域上的北东向断裂带构成共轭关系,两者是在先存构造基础上,由于新构造应力场作用而发育起来的一套地壳共轭剪切破裂系统^[31,43]。

4.2.2 穿过长三角城市群群的典型北西向断裂——无锡—宿迁断裂带

前人资料显示,长三角地区发育多条北西—北西西向活动断裂^[26,28,44],其中在地质-地貌上表现最为显著的莫过于斜穿整个长三角城市群群的无锡—宿迁断裂带。该断裂整体呈北西向展布,以左旋走滑活动为主,但具有较明显的正断成分,在扬州—无锡—苏州段主要表现为南西侧抬升,北东侧断陷。前人认为该断裂带北起邳县,穿越郯庐断裂带,经宿迁、洪泽、高邮、镇江、常州延伸至无锡以南,全长约300 km^[28]。重新分析地质及遥感影像资料发现,根据该断裂较为显著的线性影像特征,其形迹至少可从山东省的聊城附近开始,向东南经东平湖、独山湖与邵阳湖、微山湖、骆马湖与宿迁、洪泽、高邮湖与邵伯湖、扬州与镇江东、常州、无锡、苏州和嘉兴等地,继续穿过杭州湾从宁波与舟山间向东南延入东海,全长约900 km。另外,遥感和DEM图像显示,该断裂从山东聊城附近向北西可与石家庄西侧太行山东麓的北西向盆山边界呼应,似乎暗示该断裂可能穿过河北平原延伸到了太行山东麓一带,如果如此,其总长度将达到1200 km左右,属于活动特征与华北地区的张家口—蓬莱断裂带类似、但规模更大的区域性活动断裂带。该断裂带的走向变化和局部的不连续指示其具有较明显的分段性,可初步划分为聊城—宿迁断裂、洪泽湖—扬州断裂、无锡—苏州断裂和嘉善—舟山等段落,其中扬州至宿迁之间沿断裂发育的高邮湖和洪泽湖等都很可能与断裂带内部次级断裂左阶斜列部位产生的局部拉张断陷或构造沉降作用有关。

从地质、地貌和地震等多方面可以看出,无锡—宿迁断裂带的新构造活动性表现都是比较突出的,包括:

①明显构成了区域上的地质-地貌单元分界线。地貌上,该断裂两侧明显具有西高东低的特征,其东为平原沉降区,之西为低山丘陵剥蚀区;地质上,最主要的特征是断裂两侧的地层分布与第四纪地层厚度存在明显差异,南西侧古近纪及之前的基岩地层广泛出露,并有大面积新近纪与早更新世地层分布,但北东侧则主要以全新世地层和下伏的厚层晚更新世地层为主,并且第四纪地层由断裂西侧的几米至十几米在断层东侧突然增厚到几十米至上

百米。

②断裂对现今的湖泊、水系分布或发育具有明显的影响。如:湖泊沿断裂呈线状分布,最典型的是由东南向西北分布的太湖、高邮湖、洪泽湖、骆马湖和微山湖5个规模较大的湖泊,据此,该断裂又被称为“五湖断裂”;长江在扬州—镇江一线向东跨过断裂后,其流向发生向东南的突然偏转,也可能与断裂在第四纪期间的活动有关;在杭州湾的东南,该断裂带还控制了海岸线的展布。

③沿该断裂存在较明显的地震密集分布现象,并且历史上曾多处发生中—强震活动。如:公元925年徐州西北的 $5\frac{3}{4}$ 级地震、999年的常州 $5\frac{1}{2}$ 级地震、1624年的扬州6.0级地震和1913年的镇江5.5级地震等多个历史地震事件都可能与该断裂带的构造活动相关。

另外,该断裂带的西侧有众多新近纪火山口及第三系岩盐分布,而东部没有,这反映了断裂两侧的新生代地质演化存在差异,指示该断裂新生代期间还起着不同断块间边界构造的作用。该断裂在与郯庐断裂带相交处被后者右旋断开,显示后者晚期的活动性更强。考虑到该断裂规模大,新构造活动性明显,并且穿过长三角地区多个人口密集且经济发达的城市(包括苏南现代化建设示范区),分布于该断裂上或附近的主要城市在进行城镇规划和重大基础设施建设时应重点关注该断裂外来的潜在发震能力与危险性。

5 地震活动与未来地震危险性

地震是地壳变形过程引发断裂活动的表现,因此,与区域构造活动性和活动断裂发育情况相对应。长江经济带不同区段的地震活动性呈现出明显的差异性。其中西部的川滇地块是中国西南强震最为活跃的区域,地震活动具有频度高、震级大的特点;而在南北活动构造带以东的中东部地区(即华南断块区),地震活动整体上相对频度低、震级小。统计历史地震资料与仪器地震记录发现,长江经济带范围内自历史记载以来共发生 $M_s \geq 4.0$ 地震1623次,其中5.0级及以上地震837次,6.0级及以上地震196次,7.0级及以上地震43次,8.0级及以上地震2次。其中全部的7~8级及以上地震和绝大多数的 $6.0 \leq M < 7.0$ 地震都发生南北构造带及其以西地区,而发生在长江中东部(重庆—上海段)地区的 $6.0 \leq M < 7.0$ 地震仅12次(见表3)。区域性活动断裂带是该区中强地震活动的主要场所,如在华南地区,历史强震活动常发生在北东向断裂与北西向或近东西向断裂交汇的构造部位。由于长江经济带属于经济较发达地区,偶发的中强地震往往会造成较大经济损失,同时也会对区域吸引投资和社会经济发展产生负面效应。因此,充分认识长江经济带中、东部地区的历史地震活动特征及规律对该区科学部署防震减灾工作具有重要实际意义。

5.1 川滇地区未来强震危险性

川滇弧形旋扭构造体系区域上属于青藏滇缅印尼“反S”状(或“Z”状)旋扭活动构造体系(即地质力学中的“歹”字型构造体系)的中段。近期,笔者对整个青藏滇缅印尼“反S”状旋扭活动构造体系中 $M \geq 6.8$ 历史大地震的活动状况进行详细梳理与分析后发现,川滇弧形旋扭构造体系变形区的强震活动与青藏滇缅印尼“反S”状旋扭活动构造体系西段(即青藏高原内部,相当于“歹”字型构造体系的头部)和东段(主要为苏门答腊岛弧带,相当于“歹”字型构造体系的尾部)的强震活动之间具有明显的时空联动效应,即当头部与尾部发生大地震序列后不久(大致为数月、数年或数十年尺度),其中部(尤其是中国的川滇强震区)随即也会发生大地震^[45]。这种大地震活动上的联动效应实际上是活动构造体

表 3 长江经济带中、东部地区典型破坏性地震及相关参数一览表

Table 3 Main parameters of typical destructive earthquakes in the central-eastern Yangtze River Economic Belt

地震名称	发震时间/ 年-月-日	震级	宏观震中	最大 烈度	等震线 长轴方向	发震断层
湖北房县（西北）	788-02-12	6½	竹山县西北擂鼓台	Ⅷ	NWW	保康—房县断裂带宝丰—房县段
安徽亳州地震	1481-03-18	6.0	亳州南部	—	—	涡河断裂
江苏扬州地震	1624-02-10	6¼	扬州苏南	Ⅷ	NE	无锡—宿迁断裂带与陈家堡—小海断裂或茅东断裂 北段交汇处
湖南常德地震	1631-08-14	6¾	常德	Ⅸ	NEE	太阳山断裂
安徽霍山（东北） 地震	1652-03-23	6.0	霍山东北与六安交 界处	Ⅷ	NW	梅山—龙河口断裂和落儿岭-土地岭断裂交汇 处（？）
安徽凤台地震	1831-09-28	6¼	凤台东北	Ⅷ	NW	固镇—凤台和临泉—刘府断裂交汇处
重庆黔江地震	1856-06-10	6¼	黔江区小南海（原 湖北咸丰大路坝）	Ⅷ	NNW	恩施—咸丰断裂带（？）
贵州黔南地震	1875-06-08	6¼	罗甸	Ⅷ	NEE	娅都—紫云深断裂或开远-平塘隐伏深断裂交汇处
江西会昌地震	1806.01.11	6.0	会昌县南 40 km 湘 乡镇	Ⅷ	NNW	河源—邵武断裂带的寻乌-瑞金段
江苏镇江地震	1913-04-03	5.5	镇江	Ⅶ	NW	无锡—宿迁断裂带（？）
安徽霍山地震	1917-01-24	6¼	霍山南	Ⅷ	NNE	桐柏—磨子潭断裂与落儿岭-土地岭断裂交汇处
湖北麻城地震	1932-04-06	6.0	麻城黄土岗	Ⅷ	NNE	麻城—团风断裂
江苏溧阳地震	1974-04-22	5.5	溧阳	Ⅶ	NE	茅东断裂或金坛—南渡断裂
	1979-07-09	6.0	溧阳	Ⅷ	NE	
江西九江地震	2005-11-26	5.7	江西瑞昌	Ⅶ	NE	铜鼓—武宁—瑞昌断裂的田家垄—洗新桥断裂段

注：表中地震资料引自文献 [48~49]，发震断层是综合等震线资料和区域已知活动断裂推断

系控震作用的典型反映，同时也是构造体系中各组成部分的构造活动存在密切的运动学与动力学联系的体现。但在 1997—2000 年以来的最近一次大地震活动序列中，该构造体系中部的川滇地区却保持了超过十年的“异常平静”状态，这就有可能预示着该区未来发生大地震的危险性将显著增加。进一步根据活动断裂带上大地震危险性判定的离逝时间、地震空区和强震连锁反应等“三准则”，并结合近期对西南地区地震围空区与地震 *b* 值的最新分析结果^[46~47]初步判定，目前处于“异常平静”状态的中国西南川滇地区，当前至少存在 10 个未来大地震危险性较高的活动断裂区带^[45]，包括：鲜水河—小江断裂带中部的安宁河段与巧家段和南端的澄江—建水段，理塘—大理—瑞丽弧形构造带上的滇西北鹤庆—松桂断陷盆地、程海—宾川断裂带期纳—宾川段、畹町断裂带和南汀河断裂带，澜沧—景洪断裂带东南支（景洪段）以及活动块体内部的元谋断陷盆地和保山断陷盆地。同时，根据各断裂的晚第四纪活动性和在现今区域地壳变形中所起的作用大小进一步推断，其中的小江断裂带巧家段、畹町断裂带、程海—宾川断裂带中段、澜沧—景洪断裂带景洪段和保山盆地等地段未来的大震危险性可能更高。

由于青藏高原缅甸“歹”字型构造体系规模巨大，目前关于其中各构造部位的活动断裂与地震地质研究程度还十分有限，不仅尚有一些未知的活动断裂存在，而且对于已知的许多活动断裂也多缺乏断裂活动性的定量研究和古地震研究资料。同时，关于不同区域活动断裂之间的运动学与动力学联系也还存在诸多不同认识或多解性。因此，这里从构造体系角度对该区地震危险性的初步分析与评价，还只能初步圈定出近期大地震危险性比较明显的大致区域或范围，尚无法给出更具体的震中位置和震级。但不可否认的是，当前藏东—川西—云南地区出现的大范围强震活动异常平静现象，与该区近年来的大面积干旱气候异常区也基本吻合，由于区域上的大面积长期干旱可能会引起地壳上部断裂带附近岩层孔隙水含量降低，

造成岩石空隙压力减少,增加岩石强度,使得断裂带更容易积累大的应力,从而增加诱发更大地震的可能性。因此,该区近年来的长期地震平静与气候异常相耦合现象值得高度警惕,有必要进一步围绕重点地区或构造部位开展更全面深入的调查研究,并进一步深入分析该区未来的大地震危险性,从而科学合理地选择重点监测区带,加强相关地区的地震地质调查与研究,尤其是区域上可能影响重要城镇区的主要控震断裂带的现今活动性与古地震的调查研究以及现今地震活动的综合监测与分析等,以便为更精确地判定该区未来大地震活动可能的震中位置与震级,更科学地分析该区的大地震危险趋势提供扎实可靠的基础数据和地质依据。

5.2 长江经济带中、东部的历史地震活动与未来强震危险性

与活动断裂的发育情况相对应,长江经济带的地震活动性也具有明显的区带性(见图2)。其中西部的川滇地块是中国西南强震最为活跃的区域,地震活动具有频度高、震级大的特点。而在南北活动构造带以东的中东部地区(即华南断块区),地震活动整体上频度低、震级小。尤其是重庆以东的长江经济带中、东部地区,地震活动性明显较弱,历史上发生的破坏性地震数量较少(见表3),其中6.0级以上强震活动只有7次。最大地震是1631年湖南常德 $M 6\frac{3}{4}$ 地震,极震区烈度达IX;地表次生地质灾害最严重的是1856年重庆黔江 $6\frac{1}{4}$ 地震(原称湖北咸丰大路坝地震),地震级诱发的小南海地震滑坡,形成长5 km堰塞湖,滑坡体构成的堰塞坝长1170 m,高67.5 m,总体积约 $6000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

综合长江经济带中、东部地区主要历史地震活动及其控震构造特征可知,区域中—强地震活动主要沿断裂构造发生或集中在断裂线上及其两侧,并且其发生的构造部位具有明显规律^[26,28]。这些特殊的构造部位包括:①不同构造单元的边界带,并且越是大型构造单元的边界越容易孕育更高强度的地震;②新生代或第四纪盆-山边界或过渡地带,因为这经常是控盆断裂发育部位;③不同走向断裂的交叉部位以及区域性活动断裂的两端和走向转折等特殊的应力集中部位。在长江经济带中、东部的棋盘格式活动构造体系格局中,区域性北北东—北东断裂与北西—北西西断裂的交汇部位将最易出现破坏型地震,从地质力学观点可知,这里构造应力最易集中,因此是构造体系中断裂更易于活动并最可能引发地震的发震构造部位^[50]。

由于活动断裂和构造体系对长江经济带中、东部地区中—强地震活动的明显控制作用,在近东西向挤压的现今构造应力场作用下,具备上述特殊地质-构造条件的部位显然存在重复发生中—强地震活动的潜力,只是重复的时间间隔会因断裂活动强度不同而变化,可能从千年到万年不等。历史地震重演原则认为,历史上发生过中—强地震的地段,未来仍可能再次发生类似强度的地震。而构造地震类比原则认为,具有相似地质构造条件的部位将存在发生类似强度地震的可能性。据此可以推断,长江经济带中、东部的历史强震活动区具有重复发生强震的可能性,如常德、麻城、霍山、扬州和溧阳等地区,以及与这些强震区地质构造条件类似的区域,如荆州、岳阳与湘阴、无锡与苏州等地。另外,江苏北部和长江三角洲地区还存在一些走向和规模不同的隐伏第四纪断裂带,也应注意其发生6.0级以上破坏性地震的潜在危险性。

5.3 长江经济带中、东部值得关注的古地震地质遗迹

古地震又称史前地震,指通过地质、地貌调查研究识别出的或通过考古发现的无明确历史记载的地震事件,后者又称考古地震。古地震研究可以揭示或恢复活动断裂带或特定区域内地质历史期间的大地震事件序列,从而弥补历史地震记录时间过短的缺陷,有助于更全面地认识和了解区域大地震的活动过程、特征与规律,并为分析判断未来的大地震危险性提供

科学依据。因此,古地震是地震地质领域的重要研究内容,也是区域大地震危险性评价必不可少的一环。长江经济带跨越了从青藏高原东缘至东部沿海地区,以龙门山构造带至安宁河—小江断裂带为界,其西部地区由于断裂活动性强导致历史地震活动频度高且强度大,而中、东部地区因断裂第四纪活动性较弱,历史地震强度与频率都较低,仅根据历史地震记录难以全面反映区域的最大发震潜力,因此,了解掌握其古地震活动情况就显得更为重要。

长江经济带中、东部地区绝大多数的断裂活动性相对于上游的青藏高原周边地区明显要弱得多,相应的,多数断裂的潜在发震能力弱且发震频率低。沿江的重庆、湖北与湖南、江西与安徽、江苏、浙江和上海等地历史记载的最大地震震级都不大于 6.8 级,而统计和经验表明,中国大陆地震能够产生地表破裂的震级至少要在 6.8 级以上^[51]。也就是说,长江经济带中、东部地区绝大多数地震是不产生地表破裂的,但这不等于说不会留下地表遗迹,因为地震除了同震地表破裂遗迹之外,还会产生喷砂冒水、地裂缝、崩塌滑坡等次生现象,这些现象也可以成为探索区域古地震活动的重要地质证据。实际上,前人在长江经济带中、东部地区的地质调查研究中已经注意到一些可能与古地震相关的地质遗迹。如 20 世纪 80 年代初,丁灏等^[52]在江苏溧阳沙河两岸人工开挖的数十个“砂矿坑”剖面中多处发现全新世粉砂质亚黏土层中存在“散乱无序的粗大树木”呈“团堆状”夹杂分布其中,并裹夹有丰富的新石器和陶器等,同时还伴有液化褶曲、揉皱和局部断错等与构造变形有关的迹象,从而认为此类特殊沉积应属具有崩滑堆积特征的地震成因沉积物,称之为“麓崩堆积”。根据溧阳沙河麓崩堆积中文物的时代,结合历史记载,认为该区在东汉后期至三国期间的公元 123 年和 250 年先后发生过两次震级可能在 7 级左右的古地震。最近,武汉地质调查中心的陈立德^[33]和齐信等^[53]在开展长江中游城市群地质环境调查与区划综合研究过程中,分别在武汉阳逻和江西九江地区的第四纪地层中发现了可能与古地震活动有关的疑似古地震楔或地裂缝等地质遗迹。陈立德等^[33]沿武汉阳逻王母山一带的下更新统阳逻砾石层中发现了集中分布的疑似古地震楔构造,认为其可能是从阳逻一带穿过的北西向襄(樊)—广(济)断裂带中的王母山断裂中更新世期间古地震活动的记录;齐信等^[53]在九江地区发现,一些第四纪地层中发育有较丰富的地裂缝,通过野外实测地裂缝的宏观和微观特征,分析地裂缝与区域断裂分布的关系,认为九江地区第四系中典型地裂缝的发育可能是区域性断裂活动和古地震事件在地表的响应。这些前人的研究成果表明,长江经济带中、东部地区古地震遗迹的调查研究对于全面认识该区主要活动断裂的发震潜力和强震活动规律具有重要意义。

笔者 2015 年年底沿长江干流重庆—南京段进行地质踏勘过程中,在多处发现值得注意的古地震活动遗迹(见图 7),包括地震楔、断错地层和断层楔等在活动断裂中较常见的典型古地震标志^[54]。

目前发现的古地震遗迹多出现在晚白垩世至第四纪早期的地层中,一方面说明长江经济带中、东部地区第三纪期间曾出现较大强度地震活动现象,但古地震活动频率整体可能较低;同时表明该区存在发生可能导致地表显著破坏或产生地表破裂的大地震潜能,只是在晚第四纪期间这种大地震活动的潜在危险区可能出现的构造位置还需进一步深入研究。

5.3.1 宜昌三峡机场地区的疑似古地震楔

在三峡机场北约 7.2 km 附近的木鱼山北西路边(北纬 30°37.205',东经 111°29.05',海拔 116 m),厚 1.0~1.5 m 的冲积砾石层不整合覆盖在一套第三纪红色砂岩地层之上,并在两者接触面上出现砾石层呈楔状体插入下伏红色砂岩层之中的现象(见图 7a)。这一现象类似于地震楔,推测可能是在砾石层堆积过程中因古地震产生地裂缝从而导致砾石层充填其

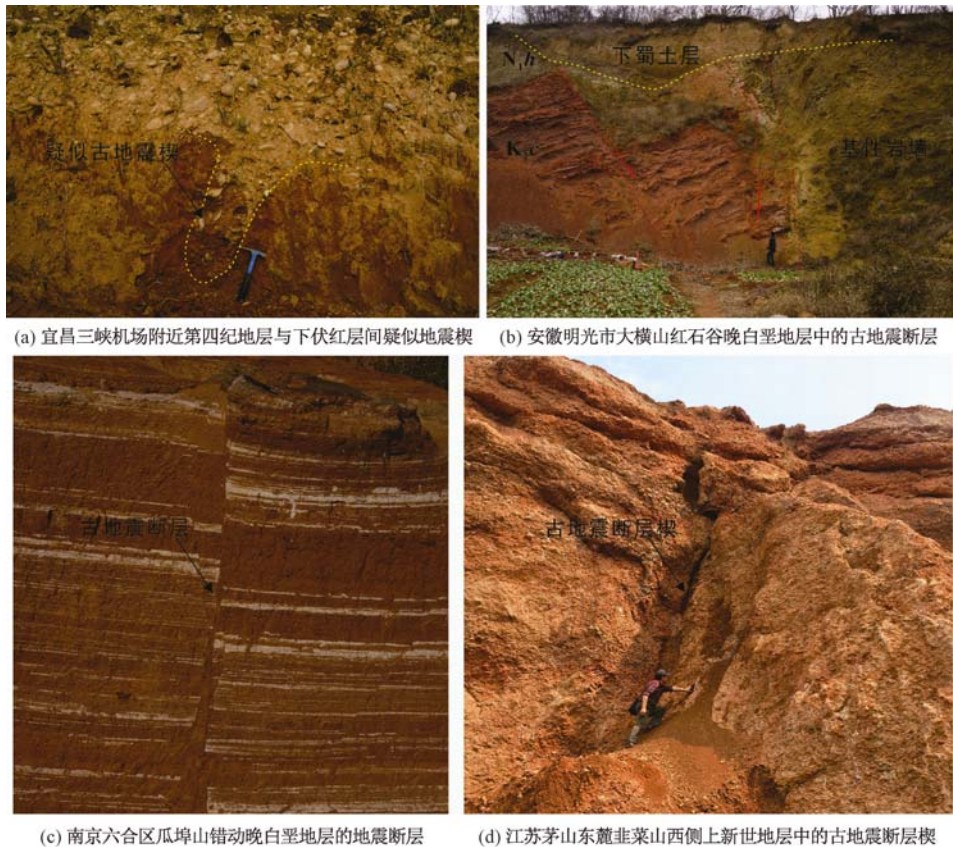


图7 长江经济带中、东部地区的典型古地震地质遗迹

Fig. 7 The typical geological relics of paleo-earthquakes along the central-eastern Yangtze River Economic Belt

中形成的;并且该点北距江汉盆地西北侧的远安断裂和雾渡河断裂 28 ~ 30 km,很可能会受到这些断裂带上强震活动的影响。另外,由于此处地势相对平缓,能够在类似地形条件下已经成岩的地层中造成地裂缝的地震显然应该是强度较大的地震事件,或至少应处于地震产生的Ⅶ—Ⅷ度烈度区。由于宜昌地区历史上尚无强震记录,因此对此现象的进一步研究将有助于更深入地认识该区的地震地质环境。

5.3.2 安徽明光市大横山红石谷地质公园中的地震断层

在安徽明光市大横山红石谷地质公园中(北纬 32°36.599', 东经 118°01.067', 海拔 109 m),分布一套 K-Ar 年龄 37.6 Ma 的始新世晚期玄武岩^[55],不整合覆盖在产状 30°—40° ∠ 12°—15° 且斜层理极为发育的晚白垩纪红色细砂岩地层之上。笔者在下伏的白垩纪红色砂岩地层中多处发现北北东向近直立如刀切般的小断层垂直错动地层现象,并主要表现为正断错动(见图 7b)。这种脆性的粘滑性质的断层显然是古地震活动产生的地震断层。虽然该现象出现在白垩纪地层中,但应该是第三纪期间形成的。由于中国东部第三纪以来的区域构造应力场方向整体变化不大,因此需要注意类似的古地震活动是否还会重复出现,并且由于该区临近郯庐断裂带的安徽段,其是否与郯庐断裂带上的古地震活动相关也有必要进一步研究。

5.3.3 南京六合区瓜埠山火山石林地质公园的地震断层

在南京六合区瓜埠山火山石林地质公园,分布一套柱状节理非常发育的玄武岩,1:200000 地质图上定为下更新统尖山组(Q_{1j}),其 K-Ar 年龄约为 9.4 Ma^[56],表明属于中新

世晚期玄武岩层。在该公园外侧（北纬 $32^{\circ}14.906'$ ，东经 $118^{\circ}53.700'$ ，海拔 41 m），可见该玄武岩层下伏上中新统黄岗组（ N_1h ），为一套黄色、红色的凝灰质砂岩、砂砾岩夹玄武岩层，区域上该套地层中玄武岩夹层的时代为距今 $10 \sim 12 \text{ Ma}^{[57]}$ 。黄岗组之下为产状 $300^{\circ}-360^{\circ} \angle 32^{\circ}-35^{\circ}$ 、紫红色的上白垩统赤山组（ K_2c ）泥岩与砂质泥岩以及一套褐绿色基性岩墙，在紫红色砂泥岩与岩墙之间为一组呈正花状结构的走滑兼正断的脆性断层，主断层产状为 $30^{\circ} \angle 78^{\circ}$ ，断面清晰且较新鲜，具有较典型的地震断层特点（见图 7c）。该地震断层顶部已被后期的灰黄色下蜀土层所覆盖，因为未见断层明显错动黄岗组，因此，推断断层活动最晚可能在中新世中期，而下蜀土沉积以来没有再活动。

5.3.4 江苏茅山东麓韭菜山西侧的古地震断层楔

在茅山东麓的溧阳县韭菜山西侧（北纬 $31^{\circ}40'04.7''$ ，东经 $119^{\circ}19'12.3''$ ，海拔 100 m），见人工开挖出露的上新世砖红色灰岩角砾岩地层剖面中发育一组可能与古地震相关的产状 $19^{\circ} \angle 56^{\circ}$ 的正断层、产状 $268^{\circ} \angle 62^{\circ}$ 的微破裂带以及呈近南北走向的正断层（见图 7d），其中断层裂隙中充填有可能相当于下蜀土的灰黄色砂土，形成类似地震楔构造。联想到茅山东麓的溧阳地区曾发生过 1979 年 6.0 级地震，因此该区的疑似古地震楔现象可能指示该区曾发生过震级更大的古地震，这也与前人根据“麓崩堆积”获得的认识^[52]相一致。

6 区域地壳稳定性

区域地壳稳定性评价是在李四光提出的“安全岛”思想基础上发展起来的，认为在活动构造带中存在相对稳定的地区，即“安全岛”，可作为重要设施和工程建设的场址，从而减少建设费用并尽量避免地震的危害^[50,58]。区域地壳稳定性一般是指“工程建设地区在内外动力（强调以内动力为主）的综合作用下，现今地壳及其表层的相对稳定程度，以及这种稳定程度与工程建筑之间的相互作用和影响”^[59~60]。这项工作更多地被用于选择相对稳定的地区作为工程建设的基地和场址。由于工程的实用性和工程地质条件的复杂性，针对工程区域的区域地壳稳定性评价在早期更为强调构造稳定性的基础上，进一步综合考虑了内外动力地质作用、岩体和土体介质条件以及人类活动等对工程建筑的相互综合作用与影响，逐步发展为涵盖了构造稳定性、地面稳定性和岩土体稳定性等多方面评价内容的综合评价方法^[60]。笔者认为，对于长江经济带地区而言，在大的空间尺度上，构造稳定性应该是决定区域地壳稳定性的最关键因素。

6.1 区域地壳稳定性分析评价结果

笔者在综合长江经济带主要活动断裂、地震活动、崩滑流和地面塌陷等地质灾害以及主要岩土体工程地质特性等资料的基础上，以构造稳定性评价为主，综合考虑岩土体稳定性评价和地面稳定性评价，对长江经济带地区的地壳稳定性进行评价分区。通过全面分析影响长江经济带地壳稳定性的主要因素，共选取 6 个代表性评价指标，其中构造稳定性影响因素为地震（ f_1 ）、地震峰值加速度（ f_2 ）、活动断裂（ f_3 ）和现代构造应力场（ f_4 ），地面稳定性主要影响因素为崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷等外动力地质作用（ f_5 ），岩土体稳定性影响因素为岩土体结构及物理力学特征（ f_6 ）。指标权重的分配依据地壳稳定性的主要影响因素分析和评价结果与实际地壳稳定性分析的吻合程度综合确定。通过反复综合分析和计算，相关评价指标含义和权重分配如下：

①地震（ f_1 ）：主要考虑地震的活动情况，包括地震活动的强度和频度，权重 0.20。

②地震动峰值加速度 (f_2): 地震动峰值速度主要影响未来地震基本烈度, 权重 0.20。

③活动断裂 (f_3): 主要考虑活动断裂的长度和深度、最新活动年龄、活动方式和活动强度, 权重 0.20。

④现代构造应力场 (f_4): 主要考虑现今构造应力作用方向、大小、集中程度, 权重 0.15。

⑤外动力地质作用 (f_5): 主要考虑崩滑流和地面塌陷地质灾害, 权重 0.10。

⑥岩土体结构及物理力学特征 (f_6): 主要考虑新近纪和第四纪地层厚度、岩土体工程地质物理力学特征, 权重 0.15。

依据上述指标及权重进行计算分析后获得的长江经济带区域地壳稳定性评价初步结果见图 8。结果表明, 长江经济带地区以稳定区和次稳定区为主, 所占面积比例分别为 29.95% 和 41.39%; 其次是次不稳定区, 面积占到 26.26%, 少数地区为不稳定区, 仅占 2.40%。其中稳定区和次稳定区主要分布在长江经济带中、东部地区; 次不稳定区和不稳定区大都分布在长江经济带的西部地区。西部的次不稳定区主要包括: 四川绵阳、宜宾、攀枝花、云南昆明、昭通、玉溪、保山和临沧等地区, 少数位于中、东部地区, 如江西九江和江苏宿迁等地。不稳定区都分布在西部川滇地区的南北构造带、滇西北大理—丽江裂陷带和滇西南的腾冲地块等地区。由于长江经济带已有资料的局限性, 这里给出的长江经济带区域地壳稳定性分析评价结果还是十分粗略和概括性的, 希望随着今后工作的更加深入, 以及对其中主要影响因素调查研究资料的进一步积累, 可进一步补充完善区域地壳稳定性评价分区结果, 尤其是对地壳次不稳定区和不稳定区开展更详细的小区划, 并在深部地质调查精度高的地区探索开展三维地壳稳定性评价分区, 以满足地下空间的开发利用。

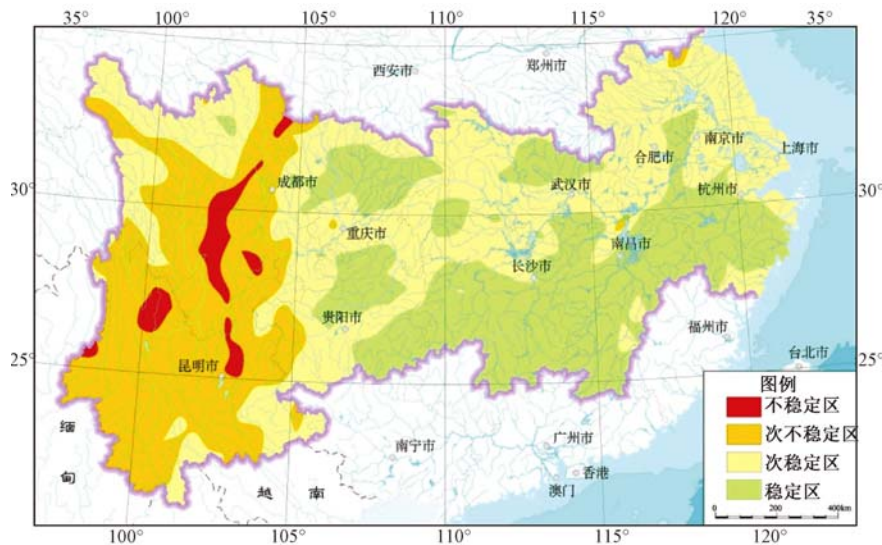


图 8 长江经济带地壳稳定性评价初步结果及分区图

Fig. 8 The preliminary assessment results and zoning of regional crust stability in the Yangtze River Economic Belt

6.2 长江经济带中、东部地区区域地壳稳定性的主要特征

在现有研究基础之上, 可从活动构造与地震地质角度初步获得长江经济带中东部地区地壳稳定性存在的基本特征。

①从大地构造与构造体系角度看, 扬子与华南地块至晚元古代碰撞拼合之后, 作为相对

统一的整体经历了长时间较为稳定的沉积过程,但期间又先后受到加里东期(主要发生在志留纪)、印支期和燕山期等多期区域造山作用的影响^[12,61],导致四川盆地以东的整个扬子—华南块体虽然保持着相对较好的完整性和相对刚性的岩石圈性质,但同时其中又发育了众多规模不等且切割深度不同的断裂构造,使得整个地块的地壳部分或上地壳部分被分割为许多微块体,这会导致整个地块中的构造应力在地壳中的分布相对分散而不易集中。另外,长江经济带中、东部地区“棋盘格式构造体系”格局本身也意味着该区多数断裂的活动性不强,即变形强度有限,没有造成不同走向断裂间出现显著的走滑错动。因此,大地构造特征和现今的活动构造体系格局表明,区域上除了切割岩石圈且构成不同构造域界限的郯庐断裂带之外,其余大部分断裂都难以孕育 7.0 级以上的高强度地震,这是长江经济带中、东部新构造变形较弱的基本构造背景。

②根据断块构造理论或活动地块观点,相对刚性的块体或盆地边界往往是区域上更容易集中应力并导致集中变形或引发地震的构造部位,如塔里木盆地的南北边界、鄂尔多斯地块周缘以及四川盆地西界等。在长江经济带中、东部地区,中—低山与丘陵地貌为主,不发育大型盆地或完整的刚性块体,而以中小型盆地为主,包括江汉—洞庭盆地、鄱阳湖盆地、合肥盆地和苏北盆地等,这些盆地周边是区域上相对显著的活动断裂发育部位,也是历史上强震活动的多发地带。因此,这些区域的地壳稳定性问题也相对更为突出。

③从板块边界作用条件来看,长江经济带西部(川滇地区)大部分区域因为属于青藏高原东缘变形带(对应南北构造带的中南段)的一部分,新构造期间变形强烈,强震多发。而长江经济带中、东部地区已经相对远离东、西两侧的板块边界,并且西部存在南北构造带这一变形缓冲带,而东部存在南黄海和东海等边缘海盆地变形缓冲区,因此,当板块作用力传递到该区时已显著减弱,再加上该区相对刚性的岩石圈性质和比较破碎的上地壳结构,显然已难以造成显著的地壳变形作用。

上述地质构造与板块边界条件决定了长江经济带中、东部地区的多数断裂是老构造形迹的重新活动,并且绝大多数应以缓慢变形为特征的低活动速率为主,因此单条断层的地震频率低且地震强度较小,虽部分断裂存在孕育 6~7 级较强地震的可能性,但发震概率小。除了一些隆起带与沉降带之间和不同断块区的边界构造带附近属于次不稳定区,其余大部分区域属构造次稳定区和稳定区。

7 活动断裂与评价面临的主要问题

活断层调查及其活动性评价是制约一个地区区域地壳稳定性评价与地震危险性评价结果的最关键因素^[9],在 20 世纪 70 年代以来的地震活跃期中,中国和邻国日本发生的多个大地震事件可以说都很“意外”,即突破了原来的地震危险区划或烈度区划,从而造成了极为惨痛的损失和教训,比如中国的 1976 年唐山 7.8 级地震、2008 年汶川 8.0 级地震和 2010 年玉树 7.1 级地震,日本的 1995 年阪神 7.3 级地震和 2011 年东日本 9.0 级大地震等,这实际上是对断裂活动性及活断层的地震危险估计不足的结果。对中国城镇化水平较高的长江经济带中、东部地区,显然应该注意类似的问题,即不能忽视断裂低活动性区域的活断层调查评价和地震危险性的问题。

7.1 活动断裂地质调查研究方面存在的主要问题

活动断裂地质调查研究的主要内容包括活断层的识别及其活动性鉴定、典型历史强震的

地质构造成因调查分析、古地震事件判别分析和与断裂活动性相关的第四纪地层及时代的调查研究等,这些也是地震地质的主要工作内容^[9]。对已有活动构造与区域地壳稳定性调查研究成果的梳理分析表明,虽然前人已在该区的活动断裂调查研究方面做了大量工作,并取得了一系列重要成果,但在与活动断裂相关的地质调查方面,仍面临许多制约区域地壳稳定性和地震危险性评价结果可靠性的较为突出问题。

①活动断裂的调查程度与覆盖面仍明显不足:目前已知区内活动断裂630条(段),其中活动性在中—强级别及以上的227条(段),进行过调查的仅64条(段),调查率约10%。区内116省会城市和地级市中,目前已知做过活动断裂详细调查的不到20%。另外,对于宜宾以东的长江经济带中、东部地区,受调查难度和技术手段的制约,活动断裂调查研究的程度总体偏低。对该区活动断裂的进一步梳理后也发现存在类似的问题,目前该区已知主要活动断裂带86条(见图4),调查研究程度较高的也只占到10%左右。因此,调查不足且许多断裂活动性不清楚是影响区域地壳稳定性评价的主要因素。

②断裂活动性的鉴别难度大:长江经济带中、东部地区面积大,断裂活动性普遍较低,加之许多城镇位于平原区或第四系覆盖区,地质露头普遍缺乏,而城镇环境又对各种观测仪器设备存在干扰和施工限制,并常降低探测手段的分辨率,这些都客观上增加了断裂活动性鉴别的难度。同时,由于缺乏统一的断裂活动性鉴别标准与规范,导致对许多断裂带的活动性认识不统一。另外,多数活动断裂常以定性研究为主,定量数据缺乏,特别是断裂活动速率数据,这些都将影响到区域地壳稳定性评价结果的可靠性。

③典型历史强震地质构造成因的调查研究深度明显不够:对历史上的扬州地震、霍山地震和常德地震等强震活动的地质构造成因缺乏全面深入的调查,制约了对区域一些主要断裂带现今活动性的认识。

④可靠的第四纪地层序列与年代标尺还相对缺乏:由于第四纪年代学技术方法的局限性和多数调查研究者缺乏对测年方法的了解和应用,导致区域上有效第四纪年代学数据的相对匮乏,缺少可靠的年代学标尺,进而地层对比和时代划分结果较为混乱,经常出现将新近纪地层误判为第四纪沉积,或对第四纪不同时代沉积做出时代误判的现象(经常将较老的沉积物判断为较新的沉积物),这会导致将老断层判断为活动断裂,或将断层的最新活动时代“人为提前”,进而导致区域地壳稳定性或地震危险性评价结果的“失真”。

⑤亟需加强新技术、新方法的应用与研发:已有的调查研究技术手段整体上较为单一,并且针对性还有待加强。如早期多以资料分析和地表观察为主,近年来围绕城市活断层探测开展过一些局部的物探工作,但还普遍缺乏面上的普查,航空遥感、地震学和地球物理等新技术新方法的应用亟需加强。同时,还应该重视针对人口密集及城镇化程度高的地区活动断裂探测技术方法的研发,重点包括“空地探测”与“深部探测”等技术方法手段,从而有效提高活动断裂探测的精度与可靠性。

7.2 城市活断层调查评价中需注意的主要问题

越是大城市,现代化程度越高,地震造成的损失也越大,更应该加强活动构造调查,并防范相关的地震灾害。长江经济带中、东部地区是中国大陆城镇化整体水平较高的区域,其中分布许多人口密集的大城市与特大城市,这些城市在历史上往往鲜有破坏性地震,现代地震活动也通常不显著,常给人一种安全感。但正如日本地震地质学家松田石彦所指,对于一些现今地震活动性一般很低的活断层,往往容易低估地震危险性,最终可能造成本来可以避免或减轻的灾难^[62~63]。因此,长江经济带地区的城市活动断裂调查评价也应该注意断裂活

动性评价及地震危险性低估问题。

7.2.1 断裂活动性判定的“上断点”方法及其局限性

目前,我国地震部门在城市地震活断层评价工作中将晚更新世活动过的断层(Q_3)定义为“活断层”,其在探测剖面中的标志即为断层“上断点”是否进入晚更新世地层(Q_3),这也同时成为综合确定断层最新活动年代的主要依据。因此,“上断点”位置和深度对于厚层第四纪沉积层覆盖区隐伏断层的活动性判断甚为关键。但这一方法应用上存在比较突出的局限性。因为当震源深度相同时,沉积物越薄,震级越大,其位错到达地表的可能性较大,反之则位错到达地表的可能性较小,即地震破裂能否到达地表与震级大小和松散沉积层厚度密切相关。根据对中国大陆强震的同震地表破裂统计结果,地震强度小于6.8级的地震破裂通常不会到达地表^[51]。但通常而言,在第四纪松散沉积物覆盖层较厚(超过50 m或上百米)的地区,在距今100 ka内即使发生过多6~7级及以下强震活动,其地震破裂也多不会贯通地表,“上断点”则很可能达不到 Q_3 层位,而通常位于比 Q_3 更老的下伏地层中,此时用“上断点”进入 Q_3 作为判断活断层的标志就是不合适的,并可能遗漏活断层,从而导致对城市地震危险性的低估或误判。因此,用“上断点”层位确定断层最新活动年代更适合具有7.0级以上大地震潜力且松散沉积层厚度较薄的地区,而对于许多位于较厚层第四纪沉积物覆盖区且断裂活动性普遍较弱的长江经济带中、东部的城镇区则显然是具有局限性的。这种局限性的主要表现一是“上断点”层位作为活动性指标的局限性,二是探测手段有效深度范围和分辨率的有限性^[62]。因为在第四纪覆盖区,利用断层“上断点”判定断裂活动时代与活动性会受到地球物理观测手段分辨率的限制,常使小于5 m的断距实际上无法分辨,并可能导致物探剖面揭露的断层“上断点”深度常常低于实际“上断点”几十米甚至更大。这两个问题都是难度很大的问题,共同点都是使探测的“上断点”深度大于其真实深度,结果常常漏掉活断层或低估活断层的活动性,进而导致误判活断层的潜在发震能力与未来地震危险性。因此,利用“上断点”指标确定活动断裂及其最新活动时代虽理论上有其合理性,但在应用于判断第四纪松散覆盖层厚度上百米的平原区和断层活动性相对较弱的大城市地区的断层活动性时,还应该充分利用地质资料做更全面深入的分析。

7.2.2 利用历史地震资料进行城市地震危险性评价的局限性

历史上的地震大灾难表明,对于没有区域性大断裂通过、历史上也无中—强以上地震记录,并且现今地震活动不显著的大城市,也需要重视其断裂活动性与强震危险性问题^[62~63]。因为在中国大陆一些新构造和现代构造活动较弱的地区,虽然晚第四纪断裂活动不甚明显,但第四纪期间仍具有弱活动的断裂,也存在发生中等甚至强烈破坏性地震的可能^[8]。但当前城市地震危险性评价常过于依赖于历史地震资料和有限的现代地震资料,由于历史地震记录时段有限,中国大陆的城市地区一般只能获得几百年至近千年较为准确的地震信息,这相对于低活动速率断裂和地质时间尺度而言,能够提供的地震活动时段短且有限,显然是不全面的。因此,在城市断层评价时低估危险性的情况更为常见,并且有时低估比高估的危害性可能更大,唐山地震和阪神地震都是这种低估的实例,代价十分惨重。在城市活断层评价中应该汲取这些教训,避免和减少因技术问题导致的估计不足和失误^[63]。这一方面需要重视和加强考古地震和古地震的研究,以弥补历史地震记录的不足;另一方面,城市地震危险性评价应建立在可靠的活断层调查研究结果之上,而城市活断层的正确评价则基于详细的探查,在摸清城市地下断层系统的基础上,进一步详细确定其最新活动年代与活动性、现今力学状态及未来活动危险性等,从而为地震危险性评价提供更全面可靠的依据。

8 主要结论

长江经济带地区的现今地壳变形受到西南印度板块与欧亚板块陆陆碰撞造山导致的青藏高原物质向东挤出和东部太平洋板块向西快速俯冲的双重影响。大致以郯庐断裂带为界,西部和中部地区受印度板块向北的陆内俯冲与碰撞作用的影响显著,而东部地区受西太平洋板块作用的影响相对明显。这一动力学背景造成了该区比较明显的活动构造东、西分区现象,大致沿成都—宜宾—曲靖一线(或龙门山构造带及小江断裂带一线)以西的区域第四纪期间的地壳变形强烈,活动断裂密度大,强震活动频度高,发育以围绕东喜马拉雅构造结为旋转极的川滇弧形旋扭活动构造体系。在该线分界线与郯庐断裂带之间的中部地区,第四纪期间的地壳变形明显较弱,活动断裂密度较低,历史强震活动数量很少。郯庐断裂带以东的东部地区的第四纪地壳活动性介于西部和中部地区之间,属于中等偏弱,活动断裂密度中等,强震活动频度低,但高于中部地区。虽然构造活动强度存在差异性,但中、东部地区的活动构造体系格局具有相似性,均属于主要由北西—北西西向和北东—北北东向两组断裂为主构成的、具有共轭走滑断裂系统特点的简单剪切型“棋盘格子式”活动构造体系。

长江经济带中、东部地区的第四纪活动性较为明显的活动断裂带主要有86条,虽然大多数断裂的活动强度相对西部地区要弱得多,但其中至少可进一步厘定出32条规模与活动性相对更为显著且对区域主要城市群地壳稳定性可造成明显影响的活动断裂。其中7条可能存在较显著发震潜能且对重要城市群发展及区域地壳稳定性具有重要影响的活动断裂值得重点关注,包括:川东鄂西的黔江—建始断裂带,江汉—洞庭盆地两侧的常德—荆州断裂带与岳阳—武汉断裂带,皖江河谷中的郯庐断裂带南段、安庆断裂带和皖江断裂带,穿过整个长三角城市群的北西向无锡—宿迁断裂带。

长江经济带范围内有历史记载以来的全部7~8级及以上地震和绝大多数 $6.0 \leq M < 7.0$ 地震都发生在南北构造带及其以西地区,在长江中、东部(重庆—上海段)地区尚未发生过 $M \geq 7.0$ 地震,但出现过12次 $6.0 \leq M < 7.0$ 地震。活动构造体系格局对区域地震活动具有明显控制作用,活动断裂带是中强地震活动的主要场所,而在中、东部地区,不同走向断裂的交汇部位经常是强震活动的重要场所。长江经济带西部的西南川滇地块及邻区近年来一直处于“异常平静”状态,至少存在10个未来大地震危险性较高的活动断裂区带,分别为:鲜水河—小江断裂带安宁河段、巧家段和南端的澄江—建水段,理塘—大理—瑞丽弧形构造带上的滇西北鹤庆—松桂断陷盆地地区与程海—宾川断裂带中部的期纳—宾川段以及畹町断裂带和南汀河断裂带,澜沧—景洪断裂带东南支(景洪段)。另外,川滇块体内部的元谋断陷盆地和保山断陷盆地也值得注意。在长江经济带中、东部需重点关注历史强震活动区重复发生强震的可能性,如常德、麻城、霍山、扬州和溧阳等地区,以及与这些强震区地质构造条件类似的区域,如荆州、岳阳与湘阴、无锡与苏州等地。江苏北部和长江三角洲地区还存在一些走向和规模不同的隐伏第四纪断裂带,也应注意其发生6.0级以上破坏性地震的潜在危险性。另外,针对长江经济带中、东部地区断裂活动强度弱、历史强震活动频度低的特点,需要通过考古地震和古地震的调查研究弥补历史地震记录时段有限的不足,尤其要关注新生代不同时代地层中保留的地震楔、地震断层和断层楔等地质遗迹,从而为更全面评估区域地震危险性提供科学依据。

区域地壳稳定性评价的初步结果表明,长江经济带地区有三分之二的区域属于稳定区和

次稳定区, 次不稳定区面积占到四分之一多, 而不稳定区仅占不足 3%。其中稳定区和次稳定区主要分布在长江经济带中、东部地区; 次不稳定区和不稳定区绝大多数分布在长江经济带的西部。总体而言, 长江经济带中、东部地区的活动断裂主要是老构造形迹在新构造应力场作用下的重新活动, 除郯庐断裂带外, 绝大多数以缓慢变形为特征的低活动速率为主, 因此单条断层的地震频率低且强度有限, 虽部分断裂存在孕育 6~7 级较强地震的可能性, 但发震概率小, 然而偶发的 6~7 级破坏性强震对人口密集和经济发达的区域而言造成的损失及影响却可能是特别显著的, 尤其要关注相对刚性的块体或盆地周边以及不同走向断裂的交汇部位等强震活动的易发地带。

断层活动性判定是制约长江经济带地区活动构造与区域地壳稳定性调查评价结果的最关键因素, 但面临着多方面的问题和挑战, 包括: 区域活动断裂普查的覆盖面和主要断裂的调查程度都明显不足; 长江经济带中、东部地区的地质、地理及人文条件使得断裂活动性的鉴别难度明显增大; 对典型历史强震地质构造成因的认知程度明显不够, 并影响到区域主要活动断裂的准确厘定; 可靠的第四纪地层序列与年代标尺还相对缺乏, 可能导致对断裂最新活动时代评价结果的“失真”; 目前相对有限的经费投入限制了新技术与新方法的应用与研发。另外, 应重视断裂低活动性区域的活断层调查评价和地震危险性评价, 并且在城市活断层调查评价中要特别注意断裂活动性判定的“上断点”方法在平原区和第四纪覆盖区应用中的局限性问题, 以及利用历史地震资料进行城市地震危险性评价的局限性和可能导致的地震危险性低估问题。

致谢 成文过程中与中国地质科学院地质力学研究所的龙长兴研究员和李建华副研究员进行了有益的探讨, 首都师范大学的李凯硕士研究生协助完成了部分图件的绘制, 在此一并表示感谢!

参 考 文 献

- [1] 邓起东, 冉永康, 杨晓平, 等. 中国活动构造图 [M]. 北京: 地震出版社, 2007.
DENG Qi-dong, RAN Yong-kang, YANG Xiao-ping, et al. Map of active tectonic of China [M]. Beijing: Seismological Press, 2007.
- [2] 吴中海, 赵希涛, 范桃园, 等. 泛亚铁路滇西大理至瑞丽沿线主要活动断裂与地震地质特征 [J]. 地质通报, 2012, 31 (2/3): 191~217.
WU Zhong-hai, ZHAO Xi-tao, FAN Tao-yuan, et al. Active faults and seismologic characteristics along the Dali-Ruili railway in western Yunnan Province [J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31 (2/3): 191~217.
- [3] 吴中海, 龙长兴, 范桃园, 等. 青藏高原东南缘弧形旋扭活动构造体系及其动力学特征与机制 [J]. 地质通报, 2015, 34 (1): 1~31.
WU Zhong-hai, LONG Chang-xing, FAN Tao-yuan, et al. The arc rotational-shear active tectonic system on the southeastern margin of Tibetan Plateau and its dynamic characteristics and mechanism [J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34 (1): 1~31.
- [4] 姚鑫, 李凌婧, 张永双, 等. 青藏高原东缘区域地壳稳定性评价 [J]. 地质通报, 2015, 34 (1): 32~44.
YAO Xin, LI Ling-jing, ZHANG Yong-shuang, et al. Regional crustal stability assessment of the eastern margin of Tibetan Plateau [J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34 (1): 32~44.
- [5] Wallace R E. Studies in geophysics-active tectonics: Impact on society [M]. Washington, D C: National Academy Press, 1986: 1~176.
- [6] Yeats R S, Sieh K, Allen C R. The geology of earthquake [M]. New York: Oxford University Press, 1997.
- [7] 邓起东, 徐锡伟, 于贵华. 中国大陆活动断裂的分区特征及其成因 [C] //中国地震学会地震地质专业委员会.

- 中国活动断层研究. 北京: 地震出版社, 1994: 1~14.
- DENG Qi-dong, XU Xi-wei, YU Gui-hua. Characteristics of regionalization of active faults in China and their genesis [C] //Committee on Seismogeology of the Seismological Society of China. Study on active faults in China. Beijing: Seismological Press, 1994: 1~14.
- [8] 邓起东, 闻学泽. 活动构造研究——历史、进展与建议 [J]. 地震地质, 2008, 30 (1): 1~30.
- DENG Qi-dong, WEN Xue-ze. A review on the research of active tectonics: History, progress and suggestions [J]. Seismology and Geology, 2008, 30 (1): 1~30.
- [9] 吴中海, 张岳桥, 胡道功. 新构造、活动构造与地震地质 [J]. 地质通报, 2014, 33 (4): 391~402.
- WU Zhong-hai, ZHANG Yue-qiao, HU Dao-gong. Neotectonics, active tectonics and earthquake geology [J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33 (4): 391~402.
- [10] 邓起东. 中国的活动断裂 [C] //中国地震学会地震地质专业委员会. 中国活动断裂. 北京: 地震出版社, 1982: 19~27.
- DENG Qi-dong. The active faults in China [C] //Committee on Seismogeology of the Seismological Society of China. The active faults in China. Beijing: Seismological Press, 1982: 19~27.
- [11] 马丽芳. 中国地质图集 [M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- MA Li-fang. China's Geological Atlas [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.
- [12] 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 中国大地构造单元划分 [J]. 中国地质, 2009, 36 (1): 1~28.
- PAN Gui-tang, XIAO Qing-hui, LU Song-nian, et al. Subdivision of tectonic units in China [J]. Geology in China, 2009, 36 (1): 1~28.
- [13] Wang E C, Burchfiel B C, Royden L H, et al. Late Cenozoic Xianshuihe-Xiaojiang Red River, and Dali fault systems of southwestern Sichuan and central Yunnan, China [J]. Geological Society of America Special Paper, 1998, 327: 1~108.
- [14] 张培震, 邓起东, 张竹琪, 等. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程 [J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43 (10): 1607~1620.
- ZHANG Pei-zhen, DENG Qi-dong, ZHANG Zhu-qi, et al. Active faults, earthquake hazards and associated geodynamic processes in continental China [J]. Science in China: Earth Sciences, 2013, 43 (10): 1607~1620.
- [15] 张培震, 王琪, 马宗晋. 青藏高原现今构造变形特征与 GPS 速度场 [J]. 地学前缘, 2002, 9 (2): 442~450.
- ZHANG Pei-zhen, WANG Qi, MA Zong-jin. GPS velocity field and active crustal deformation in and around the Qinghai-Tibet plateau. [J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9 (2): 442~450.
- [16] Shen Z-K, Lü J, Wang M, et al. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan plateau [J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110, B11409.
- [17] 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 中国活动构造基本特征 [J]. 中国科学: D 辑, 2002, 32 (12): 1021~1030.
- DENG Qi-dong, ZHANG Pei-zhen, RAN Yong-kang, et al. Basic characteristics of active tectonics of China [J]. Science in China: Series D, 2002, 32 (12): 1020~1030.
- [18] 六省(市)震源机制小组. 由震源机制解推断苏鲁皖豫地区的现代构造应力场 [J]. 地震地质, 1981, 3 (1): 19~28.
- United Group of Focal Mechanism. Study of recent tectonic stress field in Jiangsu-Shandong-Anhui-Henan region from the focal mechanism solutions [J]. Seismology and Geology, 1981, 3 (1): 19~28.
- [19] 汪素云, 许忠淮. 中国东部大陆的地震构造应力场 [J]. 地震学报, 1985, 7 (1): 17~31.
- WANG Su-yun, XU Zhong-huai. Seismo-tectonic stress field in east China [J]. Acta Siesmologica Sinica, 1985, 7 (1): 17~31.
- [20] 汪素云, 许忠淮, 葛民. 黄海、东海及邻区的地震构造应力场 [J]. 中国地震, 1987, 3 (3): 18~25.
- WANG Su-yun, XU Zhong-huai, GE Min. Seismo-tectonic stress field in eastern sea area of China [J]. Earthquake Research in China, 1987, 3 (3): 18~25.
- [21] 许忠淮, 吴少武. 南黄海和东海地区现代构造应力场特征的研究 [J]. 地球物理学报, 1997, 40 (6): 773~781.
- XU Zhong-huai, WU Shao-wu. A study on present day tectonic stress in the southern yellow sea and east China sea region [J]. Acta Geophysica Sinica, 1997, 40 (6): 773~781.
- [22] 郑月军, 张世民, 崔效锋, 等. 地震震源机制解在华南及邻区潜源区长轴方向判定中的应用 [J]. 中国地震, 2006, 22 (1): 24~33.

- ZHENG Yue-jun, ZHANG Shi-min, CUI Xiao-feng, et al. Application of the seismic source mechanism in the determination of the long axis of the potential source region of southern China and its adjacent area [J]. *China Earthquake*, 2006, 22 (1): 24 ~ 33.
- [23] 张培震, 王琪, 马宗晋. 中国大陆现今构造运动的 GPS 速度场与活动地块 [J]. *地学前缘*, 2002, 9 (2): 430 ~ 438.
- ZHANG Pei-zhen, WANG Qi, MA Zong-jin. GPS velocity field and active crustal blocks of contemporary tectonic deformation in continental China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9 (2): 430 ~ 438.
- [24] 叶正仁, 王建. 中国大陆现今地壳运动的动力学机制 [J]. *地球物理学报*, 2004, 47 (3): 456 ~ 461.
- YE Zheng-ren, WANG Jian. Fine velocity structure of the upper mantle beneath the Xizang plateau from tomography and its geological interpretations [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47 (3): 449 ~ 455.
- [25] 李延兴, 张静华, 李智, 等. 太平洋板块俯冲对中国大陆的影响 [J]. *测绘学报*, 2006, 35 (2): 99 ~ 105.
- LI Yan-xing, ZHANG Jing-hua, LI Zhi, et al. The under thrust of pacific plate to Eurasian plate and its effect on Chinese mainland [J]. *Acta Eodaetica et Cartographica Sinica*, 2006, 35 (2): 99 ~ 105.
- [26] 朱积安, 朱履熹, 刘宜栋, 等. 上海及邻区的地质构造与地震活动 [J]. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 1984, 30 (4): 81 ~ 90.
- ZHU Ji-an, ZHU Lü-xi, LIU Yi-dong, et al. Geological structure and seismic activity in Shanghai and its vicinity [J]. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 1984, 30 (4): 81 ~ 90.
- [27] 丁宝田. 根据新构造运动及地貌特征试论武汉地区地壳稳定性 [J]. *武测科技*, 1985, (3): 38 ~ 41.
- DING Bao-tian. A preliminary analysis on the region stability of Wuhan city based on neotectonic movement and topographical features [J]. *Journal of Geomatics*, 1985, (3): 38 ~ 41.
- [28] 王斌, 梁雪萍, 周健. 江苏及其周边地区断裂活动性与地震关系的分析 [J]. *高原地震*, 2008, 20 (1): 38 ~ 43.
- WANG Bin, LIANG Xue-ping, ZHOU Jian. Analysis on relationship between fault activity and earthquakes in Jiangsu Province and its adjacent area [J]. *Plathau Earthquake Research*, 2008, 20 (1): 38 ~ 43.
- [29] WU Zhonghai, ZHANG Yongshuang, HU Daogong, et al. Late Quaternary normal faulting and its kinematic mechanism of eastern piedmont fault of the Haba-Yulong Snow Mountains in northwestern Yunnan, China [J]. *Science in China: Series D*, 2009, 52 (10): 1447 ~ 1678.
- [30] 李四光. 地质力学概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1973.
- LEE Si-guang. Introduction to geomechanics [M]. Beijing: Science Press, 1973.
- [31] 丁国瑜, 李永善. 我国地震活动与地壳现代破裂网格 [J]. *地质学报*, 1979, 53 (1): 22 ~ 34.
- DING Guo-yu, LI Yong-shan. Seismicity and the recent fracturing pattern of the earth crust in China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1979, 53 (1): 22 ~ 34.
- [32] 张文佑. 断块构造导论 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1984.
- ZHANG Wen-you. An introduction to fault-block tectonics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984.
- [33] 陈立德, 邵长生, 王岑. 武汉阳逻王母山断层及地震楔构造研究 [J]. *地质学报*, 2014, 88 (8): 1453 ~ 1460.
- CHEN Li-de, SHAO Chang-sheng, WANG Cen. Research on Wangmushan fault and paleoseismic wedges in Wuhan [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88 (8): 1453 ~ 1460.
- [34] 王华林. 1668 年郯城 8.5 级地震断裂的全新世滑动速率、古地震和强震复发周期 [J]. *地震研究*, 1996, 19 (2): 224 ~ 225.
- WANG Hua-lin. Holocene slip rate, palaeoearthquakes, and recurrence interval of strong earthquakes on the fault where 1668 Tancheng $M=8.5$ earthquake occurred, Shandong province [J]. *Journal of Seismological Research*, 1996, 19 (2): 224 ~ 225.
- [35] 汤有标, 沈子忠, 林安培, 等. 郯庐断裂带安徽段的展布及其新构造活动 [J]. *地震地质*, 1988, 10 (2): 46 ~ 50.
- TANG You-biao, SHEN Zi-zhong, LIN An-pei, et al. Extension of the Tancheng-Lujiang fault zone at the Anhui section and its neotectonic activity [J]. *Seismology and Geology*, 1988, 10 (2): 46 ~ 50.
- [36] 汤有标, 姚大全. 郯庐断裂带南段新活动性的初步研究 [J]. *地震研究*, 1990, 13 (2): 155 ~ 165.
- TANG You-biao, YAO Da-quan. A preliminary study of the new activities along the southern segment of Tancheng-Lujiang fault [J]. *Journal of Seismological Research*, 1990, 13 (2): 155 ~ 165.

- [37] 谢瑞征,丁政,朱书俊,等. 郯庐断裂带江苏及邻区第四纪活动特征 [J]. 地震学刊, 1991, 4: 1~7.
XIE Rui-zheng, DING Zheng, ZHU Shu-jun, et al. Active characteristics in the Jiangsu segment of the Tanlu fault zone and its vicinity [J]. Journal of Seismology, 1991, 4: 1~7.
- [38] 刘备,朱光,翟明见,等. 郯庐断裂带安徽段活断层特征与成因 [J]. 2015, 地质科学, 2015, 50 (2): 611~630.
LIU Bei, ZHU Guang, ZHAI Ming-jian, et al. Features and genesis of active faults in the Anhui segment of the Tanlu fault zone [J]. Chinese Journal of Geology, 2015, 50 (2): 611~630.
- [39] 汤有标,姚大全. 郯庐断裂带赤山段晚更新世以来的活动性 [J]. 中国地震, 1990, 6 (2): 63~69.
TANG You-biao, YAO Da-quan. Activity of the Chishan segment in the Tancheng-Lujiang fault zone, since the Upper Pleistocene [J]. Earthquake Research in China, 1990, 6 (2): 63~69.
- [40] 姚大全,汤有标,沈小七,等. 郯庐断裂带赤山段中晚更新世之交的史前地震遗迹 [J]. 地震地质, 2012, 34 (1): 93~99.
YAO Da-quan, TANG You-biao, SHEN Xiao-qi. Prehistoric earthquakes in Chishan segment of Tancheng-Lujiang fault zone during mid-late Pleistocene [J]. Seismology and Geology, 2012, 34 (1): 93~99.
- [41] 郑颖平,翟洪涛,李光,等. 郯庐断裂带江苏新沂—安徽宿松段地震危险性分析 [J]. 华北地震科学, 2012, 30 (2): 48~51.
ZHENG Ying-ping, ZHAI Hong-tao, LI Guang, et al. Seismic risk analysis on Xinyi-Susong fault segment of the Tanlu fault zone [J]. North China Earthquake Sciences. 2012. 30 (2): 48~51.
- [42] 徐煜坚. 论活动断裂 [C] //中国地震学会地震地质专业委员. 中国活动断裂. 北京:地震出版社, 1982: 10~13.
XU Yu-jian. On the active faults [C] //Committee on Seismogeology of the Seismological Society of China. The active faults in China. Beijing: Seismological Press, 1982: 10~13.
- [43] 徐杰,马宗晋,陈国光,等. 中国大陆东部新构造期北西向断裂带的初步探讨 [J]. 地学前缘, 2003, 10 (特刊): 193~198.
XU Jie, MA Zong-jin, CHEN Guo-guang, et al. NW trending active fault zones of the eastern Chinese continent in neotectonic time [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10 (Suppl.): 193~198.
- [44] 方大卫,沈永盛. 试论上海地震活动与北西地震带的关系 [J]. 上海地质, 1992, 13 (3): 1~9.
FANG Da-wei, SHEN Yong-sheng. A probe into relations of the seismic activities of Shanghai district to the NW seismic belt [J]. Shanghai Geology, 1992, 13 (3): 1~9.
- [45] 吴中海,赵根模,龙长兴,等. 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, 2014, 88 (8): 1401~1416.
WU Zhong-hai, ZHAO Gen-mo, LONG Chang-xing, et al. The seismic hazard assessment around south-east area of Qinghai-Xizang Plateau: A preliminary results from active tectonics system analysis [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88 (8): 1401~1416.
- [46] 刘艳辉,赵根模,吴中海,等. 地震空区法在大地震危险性初判中的应用——以青藏高原东南缘为例 [J]. 地质力学学报, 2014, 20 (3): 254~273.
LIU Yan-hui, ZHAO Gen-mo, WU Zhong-hai, et al. Application of spatial database technology and seismic gap method to seismic hazard analysis around south-eastern Tibetan Plateau [J]. Journal of Geomechanics, 2014, 20 (3): 254~273.
- [47] 刘艳辉,赵根模,吴中海,等. 青藏高原东南缘及邻区近年来地震 b 值特征 [J]. 地质通报, 2015, 34 (1): 58~70.
LIU Yan-hui, ZHAO Gen-mo, WU Zhong-hai, et al. An analysis of b value characteristics of earthquake on the southeastern margin of the Tibetan Plateau and its neighboring areas [J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34 (1): 58~70.
- [48] 闵子群,吴戈,江在雄,等. 中国历史强震目录 (公元前 23 世纪—公元 1911 年) [M]. 北京:地震出版社, 1995.
MIN Zhi-qun, WU Ge, JIANG Zai-xiong, et al. Catalogue of Chinese historical strong earthquakes (from the 23rd century B. C. to 1911 A. D.). Beijing: Seismological Press, 1995.
- [49] 楼宝棠. 中国古今地震灾情总汇 [M]. 北京:地震出版社, 1996.
LOU Bao-tang. A comprehensive compilation of historic and recent earthquakes disaster in China [M]. Beijing: Seismological Press, 1996.

- [50] 李四光. 论地震 [M]. 北京: 地质出版社, 1977.
LEE Si-guang. On earthquake [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1977.
- [51] 邓起东, 刘百箴, 张培震, 等. 活动断裂工程安全评价和位错量的定量评估 [C] //邓起东. 活动断裂研究 (2). 北京: 地震出版社, 1992: 236 ~ 246.
DENG Qi-dong, LIU Bai-zhi, ZHANG Pei-zhen, et al. Research of active fault in evaluating engineering safety and assessing amount of displacement [C] //DENG Qi-dong. Research on active fault (2). Beijing: Seismological Press, 1992: 236 ~ 246.
- [52] 丁灏, 季幼庭, 汪青青. 江苏溧阳地区全新世晚期麓崩堆积物的初步观察 [C] //中国第四纪研究委员会全新世分会, 陕西省地震局. 史前地震与第四纪地质文集. 西安: 陕西科学技术出版社, 1982: 72 ~ 81.
DING Hao, JI You-ting, WANG Qing-qing, Initial survey of the late Holocene "Lubeng" sediments in Liyang county Jiangsu province [C] //The Chinese Quaternary Research Committee Holocene Branch, Seismological Bureau of Shaanxi Province. Papers of prehistoric earthquakes and Quaternary geology. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1982: 72 ~ 81.
- [53] 齐信, 陈州丰, 邵长生, 等. 九江地区第四系中典型地裂缝特征及构造意义 [J]. 地质学报, 2015, 89 (12): 2266 ~ 2276.
QI Xin, CHEN Zhou-feng, SHAO Chang-sheng, et al. Typical fissure characteristics of the Quaternary in the Jiujiang area and their tectonic significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89 (12): 2266 ~ 2276.
- [54] 李坪, 刘行松, 吴迪忠. 谈谈古地震和古地震的识别 [J]. 地震, 1982, (5): 34 ~ 38.
LI Ping, LIU Xing-song, WU Di-zhong. About paleoseismology and its identification [J]. Earthquake, 1982, (5): 34 ~ 38.
- [55] 陈道公, 彭子成. 皖苏若干新生代火山岩的钾氩年龄和铅铀同位素特征 [J]. 岩石学报, 1988, 4 (2): 3 ~ 12.
CHEN Dao-gong, PENG Zi-cheng. K-Ar ages and Pb, Sr isotopic characteristics of some Cenozoic volcanic rocks from Anhui and Jiangsu Provinces, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 1988, 4 (2): 3 ~ 12.
- [56] 刘若新, 陈文寄, 孙建中, 等. 中国新生代火山岩的 K-Ar 年代与构造环境 [M]. 北京: 地震出版社, 1992: 11 ~ 43.
LIU Ruo-xin, CHEN Wen-ji, SUN Jian-zhong, et al. The K-Ar age and tectonic environment of Cenozoic rocks in China [M]. Beijing: Seismological Press, 1992.
- [57] 张祥云, 刘志平, 范迪富, 等. 南京-仪征地区新近纪砂砾层序及古长江的形成与演化 [J]. 江苏地质, 2003, 27 (3): 140 ~ 147.
ZHANG Xiang-yun, LIU Zhi-ping, FAN Di-fu, et al. Sandy gravel sequence in Neogene in Nanjing and Yizheng area and genesis and evolution of the old Yangtze River [J]. Jiangsu Geology, 2003, 27 (3): 140 ~ 147.
- [58] 易明初. 新构造活动与区域地壳稳定性 [M]. 北京: 地震出版社, 2003.
YI Ming-chu. Neotectonic activity and regional crustal stability [M]. Beijing: Seismological Press, 2003.
- [59] 胡海涛, 阎树彬. 青藏公路沿线 (格尔木-安多) 的区域工程地质特征 [C] //地质矿产部青藏高原地质文集编委会. 青藏高原地质文集 (5). 北京: 地质出版社, 1982: 130 ~ 144.
HU Hai-tao, YAN Shu-bin. Regional engineering geology along the Qinghai-Xizang Highway (Golmud to Anduo) [C] //CGQXP Editorial Committee, Ministry of Geology and Mineral Resources of the People's Republic of China. Contribution to the geology of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. Beijing: Geological Publishing House, 1982: 130 ~ 144.
- [60] 孙叶, 谭成轩, 李开善, 等. 区域地壳稳定性量化评价: 区域地壳稳定性地质力学 [M]. 北京: 地质出版社, 1998.
SUN Ye, TAN Cheng-xuan, LI Kai-shan, et al. Quantitative assessment and research of regional crustal stability: Geomechanics of regional crustal stability [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998.
- [61] 舒良树. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东造山带 [J]. 高效地质学报, 2006, 12 (4): 418 ~ 431.
SHU Liang-shu. Predevonian tectonic evolution of south China: From Cathaysian block to Caledonian period folded orogenic belt [J]. Geological Journal of China Universities, 2006, 12 (4): 418 ~ 431.
- [62] 赵根模, 唐仲兴, 任峰. 影响城市隐伏活断层探查与评价的两个重要问题 [J]. 地震, 2003, 23 (1): 36 ~ 40.
ZHAO Gen-mo, TANG Zhong-xing, REN Feng. Two important problems of influence in the survey and evaluation of the buried active fault in city [J]. Earthquake, 2003, 23 (1): 36 ~ 40.
- [63] 赵根模, 任峰. 城市活断层探查与评价 [J]. 减灾技术与方法, 2003, (1): 22 ~ 24.

ZHAO Gen-mo, REN Feng. Exploration and assessment of urban active faults [J]. Disaster Mitigation Technology and Method, 2003, (1): 22 ~ 24.

THE ACTIVE TECTONICS AND REGIONAL CRUSTAL STABILITY FEATURES IN THE AREA OF YANGTZE RIVER ECONOMIC BELT

WU Zhong-hai^{1,2}, ZHOU Chun-jing^{1,2}, TAN Cheng-xuan^{1,2}, SUN Yu-jun^{1,2}, MA Xiao-xue^{1,3}

(1. Neotectonics and Active Tectonics Department, Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China;

3. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: Combining the new Remote sensing interpretation and the result of surface survey with the active faults data on the Yangtze River Economic Belt, we preliminarily summarized the active tectonic features in this area, and teased out the main active faults that directly and indirectly threatening to crustal stability of important urban agglomerations, state-level new district and river-crossing channels at the Yangtze River Economic Belt region, then pointed out 32 important active faults along Chengdu-Shanghai region that belong to the middle and lower reaches of Yangtze River Economic Belt, and the influenced major urban agglomerations and major projects. After teasing out the active faults, we put forward that the strong crustal deformation and seismicity of western Yangtze River Economic Belt are mainly controlled by “the Sichuan-Yunnan arc rotational-shear active tectonic system” at southeastern margin of Qinghai-Tibetan Plateau that formed under the action of the collision between Indian Plate and Eurasian Plate. But the middle-eastern area of Yangtze River Economic Belt is a “check board” active tectonic system that has the characteristics of conjugate strike slip fault which caused by the regional extrusion shearing deformation under the action of Indian Plate and Western Pacific Plate, 7 typical active faults’ activity and their influences to the crustal stability of urban agglomeration required especially attentive. According to the features of regional active tectonic system, active faults and historic seismic activities, we preliminarily summarized the problems of future seismic hazard in this area, and the potential strong earthquake risk segment that needs to be focused on, then identified the importance of surveying the characteristics of geological relics of typical regional paleoearthquakes and paleoearthquake study. Further, the preliminary evaluation of regional crustal stability in the Yangtze River Economic Belt region showed that the unstable and sub-unstable regions are mainly concentrated in the western region, and the most of central-eastern regions are belong to the sub-stable and stable regions, but there are a few obvious sub-unstable regions along the Tanlu fault zone. Finally, we pointed out the main problems and challenges on the field surveying and evaluation of active tectonics and regional crustal stability, and the active fault identification and seismic risk evaluation of major city area in the Yangtze River Economic Belt.

Key words: the Yangtze River Economic Belt; active faults and tectonic system; paleo-earthquake; seismic hazard assessment; regional crustal stability