

文章编号: 1006-6616 (2014) 03-0254-20

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

刘艳辉^{1,2}, 赵根模^{2,3}, 吴中海¹, 李跃华^{1,2}, 马丹^{2,4}, 蒋瑶^{1,2}

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;

3. 天津市地震局, 天津 300201;

4. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

摘要:以 ARCGIS 系列软件和 VS 2010、SQL Server 2008 为平台, 通过融合集成活动构造、地震地质和国家基础地理信息, 在初步建立的青藏高原东南缘活动构造空间数据库系统基础上, 利用地震围空区方法, 针对研究区进行区域大地震危险性中长期预测分析。通过地震信息分时间、分震级的整理与数据输出, 分析汇总了 11 例 $M \geq 7.0$ 大震震例的地震空区活动图像以及围空区发震震级与围空区特征与参数。在总结出的经验公式基础上, 进一步利用 1950—2012 年的 $M \geq 5.0$ 地震数据, 对该区地震围空区的发生与发育状况进行了初步分析与研究, 并对未来可能发生大震的发震位置及震级进行了综合分析。研究结果表明, 玉树—鲜水河—小江断裂带所围限的青藏高原东南缘地区存在 6 个比较突出的与区域重要的晚第四纪活动构造带或断裂带相对应的大地震围空区, 分别是错那—沃卡裂谷, 东喜马拉雅构造结, 安宁河—则木河断裂, 南汀河断裂—红河断裂, 晚町断裂—南汀河断裂, 澜沧—景洪断裂东段。这些围空区中主要活动断裂带的晚第四纪活动性与历史地震活动状况也都显示出未来几年至几十年存在发生大地震的危险性, 在今后的地震预报工作中应给予特别关注。应用实践表明, 通过活动构造数据库的建设可快速有效地实现对区域大地震围空区的动态分析、辨别及大地震危险性初判。

关键词: 空间数据库; 活动断裂; 地震危险性; 地震围空区; 地震预报

中图分类号: P694

文献标识码: A

0 引言

世界大地震数据显示, 现今大地震活动绝大多数发生在活动构造带上, 尤其是与晚第四

收稿日期: 2014-04-30

基金项目: 中国地质调查局项目“青藏高原东南缘重要活动断裂厘定与活动构造体系综合研究”(1212011120163), “南北构造带活动构造体系综合调查与研究”(12120114002101); 中国地质科学院地质力学研究所基本科研业务费项目“成果集成与战略研究(2013-2014)” (DZLXJK201410); 国家自然科学基金项目(41171009)

作者简介: 刘艳辉(1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向地理信息系统与遥感应用。E-mail: liuyanhuizhang@163.com

通讯作者: 吴中海(1974-), 男, 研究员, 主要从事活动构造与地震地质研究。E-mail: wzhh4488@sina.com

纪全新世以来发生过多次活动,并且现今仍在活动或未来仍将活动的断裂带有着密切联系^[1-2]。因此,活动断裂的研究是地震区划、地震预测以及减轻地震和地质灾害的基础,并可为防震减灾工作提供重要参考。同时活动断裂的研究程度也直接影响着地震地质灾害研究的准确程度。本文研究区——青藏高原东南缘构成了中国南北构造带地震带的南段,是“青藏滇缅印尼歹字型构造体系”的中部主体^[3-4],其东部以玉树—鲜水河—小江断裂带为界限,是中国大陆强震活动频度最高、强度最大以及地震地质灾害相当严重的区域,但最近研究发现近十几年其一直处于相对平静状态,存在较高的大地震活动危险性^[5-6]。我国多年来对活动断裂的研究,使得活动断裂数据具有来源广泛、种类杂多、数据海量等特征,同时国家基础地理数据也在不断完善,数据都处于急剧增长的状态^[7-10]。本研究区内的各种数据也具有以上特征,显然传统的数据存储、管理模式难以满足活动断裂数据、地震数据及其相关的大量数据的系统分析整理以及活动断裂最新动态研究等需要^[11-13]。因此,如何有效地存储、管理、分析并充分利用海量地学数据,是目前国内地学领域亟待解决的科学问题。

从20世纪80年代以来,伴随着空间数据库及系统建设技术的成熟与发展,空间数据库的建设已经逐渐引起世界各国众多行业的重视,凭借其海量数据的高效存储、管理、分析的优势,该技术方法在航遥、气象、地震地质和地质灾害防治等空间属性信息巨大的科学领域中得到了广泛应用,近年来在地质领域也已逐渐成为不可缺少的技术平台^[14-17]。例如在地质灾害预报、地震围空区分析过程中,空间数据库不仅可对各类数据进行综合管理,更可以地图形式给人最直观的可视化效果,为研究人员从宏观上对区域大地震危险性判断提供了有力的技术支撑^[18]。空间数据库数据存储新技术具有安全、高效处理海量数据等特点,在地球科学领域内应用前景广泛。笔者在青藏高原东南缘活动构造空间数据库系统构建实践中,深刻体会到了其具有实现海量信息高效存储分析的优势,这一方面避免了重复工作,也可促使传统的定性描述数据向定量数据转化,更方便了对海量数据进行科学管理与分析。

本文基于青藏高原东南缘重要活动断裂厘定与活动构造体系综合研究的最新成果,结合ARCGIS系列软件和VS 2010、SQL Server 2008,系统整理了青藏高原东南缘活动构造和地震地质灾害数据,初步构建了青藏高原东南缘活动构造空间数据库及系统,目前已可实现对数据的空间属性信息的交互查询及显示。在此基础上利用数据库中的历史地震与仪器地震数据,结合活动断裂资料开展了研究区大地震围空区动态分析及大地震危险区初判。希望这一研究成果能够为地震危险性分析预测提供重要的参考。

1 空间数据库的建设与实现

1.1 数据内容与数据来源

本系统根据青藏高原东南缘活动构造体系研究需要,将数据库的应用方向确定为活动构造数据库的构建及系统展示,并以实现青藏高原东南缘大地震围空区动态分析及大地震危险初判为目标,将数据库的主要内容分为活动断裂空间数据和地震地质数据、国家基础地理数据3大部分。首先,对系统相关的所有属性数据进行梳理,将数据分为7类,即历史与仪器记录地震数据、活动断裂数据、地震地表破裂数据、地震地质数据、基础地理数据、图例及注记说明数据、各种影像和图片栅格数据。其次,将整个空间数据库的内容分为3个主要部分,即活动构造数据、地震地质数据和基础地理数据。活动构造数据和地震地质数据是整个空间数据库的主体部分,包括地震信息、不同性质的断层、GPS位移监测点、地表破裂清绘

等 17 个图层；基础地理数据的 13 个图层包括地名、行政界线、水系、道路系统、等高线等；地震地质、活动断裂等专题数据带有丰富的活动性参数及其他属性信息参数。数据库的基本内容确定之后，就是数据的收集与整理。地震数据主要综合了中国古今地震灾情总汇、全球地震目录、中国历史强震目录以及美国地质调查局、国家地震中心和中国地震台网等多项地震数据。活动断裂数据在西南地区活动构造体系图及相关数据基础上进一步综合了近年来青藏高原东南缘重要活动断裂厘定与活动构造体系综合研究的最新成果。

1.2 数据库数据基本特征及数据库设计实现

空间数据即与空间位置和空间关系相联系的数据^[15,19~21]，具有空间分布特征、时态特征、多维特征、多尺度特征、海量数据特征等^[15]。在认识活动构造数据的基本空间属性特征，并据以理清数据逻辑结构的基础上，笔者以目前比较主流的软件 ArcSDE、Arc Engine、SQL Server、Visual Studio 2010 为平台设计并实现了活动构造空间数据库及系统^[22~24]。数据库系统中有国家基础地理信息、活动构造、地震地质等 3 个基本空间数据表，并以空间位置信息（相对位置与绝对位置）和时间为索引进行数据组织与管理，实现数据的相关分析与统计。在活动构造空间数据库及系统中已实现数据对象的管理即收录、存储、编辑、地图窗口同步展示以及空间数据属性查询、选择和分析。本系统可根据用户需求对数据进行汇总统计，包括最大值、最小值、平均值、总数等；数据查询模块可实现属性信息分年度、分震级、分地区查询，主要方法是通过 SQL 语句进行查询语句的编写（见图 1），根据条件高亮显示或属性表输出方式显示，这为大地震危险性分析、围空区的划分及验证奠定了基础技术平台。

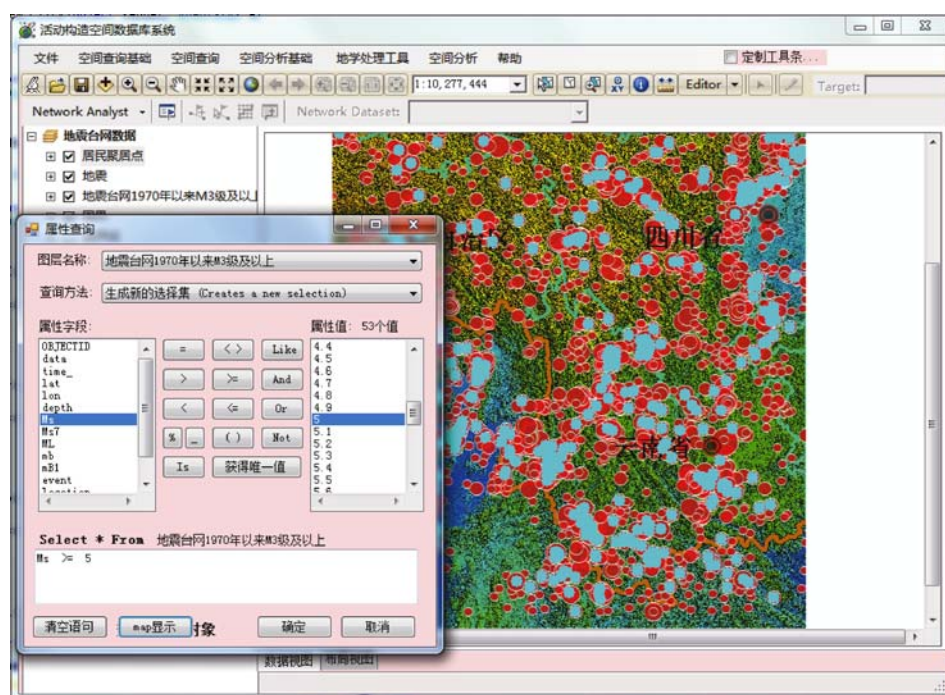


图 1 系统界面

Fig. 1 Design of system interface

2 基于地震空区方法的大地震危险性初判

由于强震是一定深度岩石发生断裂作用的结果,本质上是地壳发生突然变形的反映,尤其是大地震活动,绝大多数都沿活动断裂带发生^[25];目前鉴于科技发展水平,地震科学家不能在地球深部安装仪器直接观测震源的孕育发展过程及其前兆现象,只能利用数量有限的台网进行地震活动和前兆观测,并结合活动断裂研究资料对区域大震活动进行综合预测。目前大地震危险性分析方法理论很多,常用的有活动断裂地震复发概率方法^[26~27]、地震空区、地震活动性增强、平静、地震窗、 b 值预测等^[28~29],本文主要应用地震空区方法。地震空区理论是以强震三要素为基础的地震预测-地震活动图像分析方法中的一类,是目前地震中长期预测比较认可的方法之一。该方法在震级预报方面是可供参考的,已经得到许多大震震例的验证^[5~6]。空间数据库技术在大地震危险性预测中的应用强调将活动断裂研究资料与地震活动信息紧密结合,以实现地震活动趋势预报。因为实际发生的中小地震是多种因子综合作用的产物,是来源于地壳深部的最直接破裂符号,隐藏着重要的应力触发响应和预测信息;结合区域活动断裂带的分布及其历史强震活动状况,则有助于进一步明确或圈定未来最为可能发生大地震活动的重点区域,缩小强化监视区范围,从而为有效捕捉前兆和短期预报奠定基础。

2.1 关于地震围空区理论

地震分析预测中所称的“地震围空区”一般可理解为“异常平静区”,并不是泛指地震发生的空白区,而是特指晚第四纪期间或全新世或远古时期曾经有过大地震活动,但近现代史上常缺少大震记录,且最近几十年或几年内异常平静的活动断裂的某段落或活动构造区段,须排除在活动构造区带中的相对稳定块体或大地震危险区带中的相对安全区域。在地震空区理论中存在对空区的不同分类。按空区出现的构造部位来看,有板块边缘空区,也有板内空区;从震源深度上区分,有浅源地震空区,也有深源地震空区;如果勾画空区所取用的震级下限不同,则可区分出大空区与小空区以及长期空区与短期空区(针对空区形成时间及预报时间尺度而言)。茂木清夫^[30]曾提出常见的2类地震空区:第一类地震空区表示在一个地震带上出现于一些大地震破裂区之间的空区或空段,第二类地震空区是一个区域在较大地震发生前由震级较小的地震活动环绕的空区,又称前兆空区或环形围空区。有时两种空区都会出现,但也有些地震则没有明显的前兆空区。

2.1.1 地震带或断裂带上的空区或空段

早在1965年,著名地震学家弗多托夫就发现,板块边界带不同段落的地震活动常此起彼伏地发生,最近一轮发生大震活动的间隙段落即是下次大震活动的震源区,并据此认为板块边界带的地震有明显的填空性^[31~32]。地震与断层活动的一般关系是断层在构造应力作用下开始稳态滑动,由于受到强固体、凹凸体、障碍体的阻碍而停止滑动,然后不断累积应力。在此过程中断层不再发生显著大震,日趋平静,即处在“闭锁”状态。当积累应力的剪切应力分量达到破裂极限时,断层才突然滑动(粘滞性滑动或破裂),释放应力引发地震。而当断层处于闭锁状态时,沿该断层便会出现带状地震空区,即“那些处在板块边界但很长时间没有发生破裂的段落,最有可能在不久的将来发生地震破裂,那种段落就是地震空区”^[33]。

2.1.2 区域性环形地震围空区

区域性环形地震围空区是指一条地震带或活动断裂带在发生大震之前,周围被众多中小

地震或较低级别地震所围空的现象,称为第二类空区^[30],也可称之为“地震围空区”。在地震预测分析中,这些较大地震前震级较小的地震活动空区,又可称为前兆空区。对于某一特定区域,特别是同一活动构造体系中的构造活动区带,在一段时期内,被已发生的地震活动所围限,处于“异常平静”状态中的活动断裂带或构造带应是其中未来强震活动危险性最大的区段,并且周边地震活动的强度越大,其未来强震的震级也越大^[30,34~35]。

地震围空区是中长期(几年到几十年尺度)地震预报中得到国际认可,并被众多震例验证的地震学前兆标志之一^[29,35]。在当前的中长期大地震危险性分析工作中,大都以地震围空区理论为指导,本文也主要基于这一理论方法并以青藏高原东南缘活动构造区带为背景,以期对该区域未来几十年可能发生的大震进行分析、判定。

活动构造空间数据库及系统的成功搭建,初步实现了国家基础地理信息、活动构造信息及地震地质灾害信息的相关性分析,可将其空间上的相关性直观地表达达到地图当中,并可通过条件设定,分年度、分震级显示地震信息,这可为根据地震活动信息进一步开展大震危险性预测提供极大的方便。

2.2 青藏高原东南缘活动构造概况

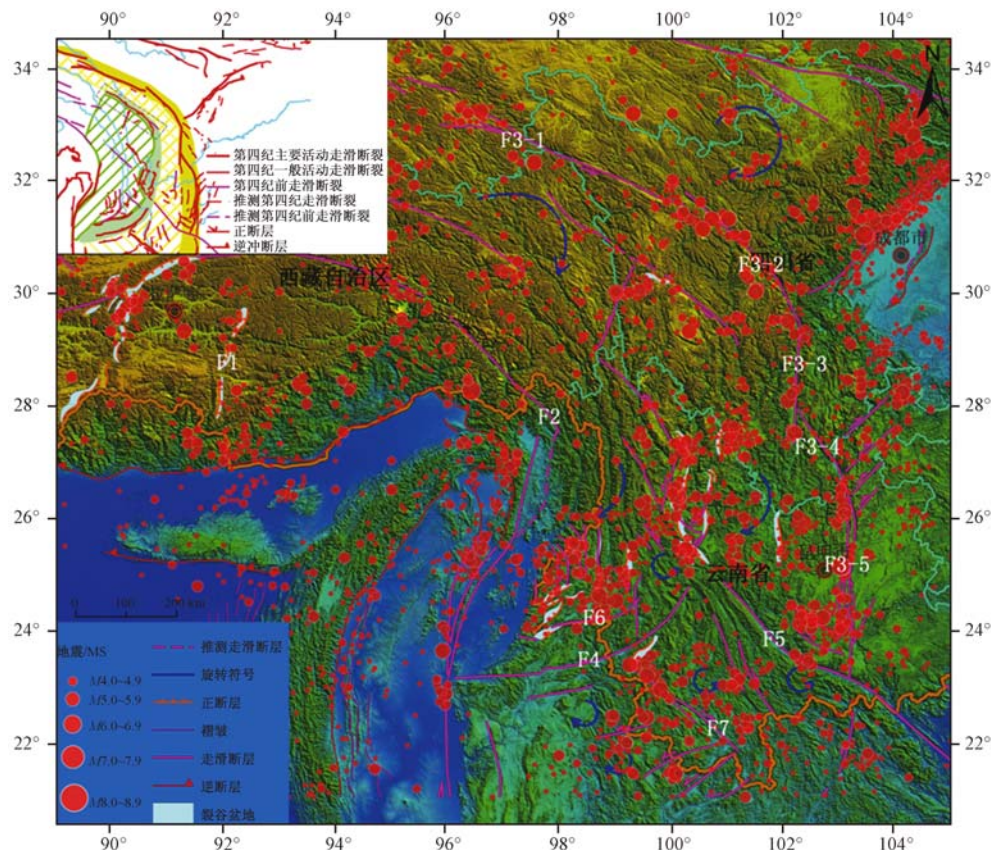
地震环形空区的划定与其中大震危险区的判定,很大程度上依赖于对区域活动断裂的认识程度。因此,全面了解区域的活动断裂发育程度及其活动性和构造体系等是开展地震围空区研究和大震危险性分析的必要前提,这可避免将安全岛误作为地震空区进行危险性划分。基于最近对青藏高原东南缘活动构造体系的综合研究^[3~4],本文所称青藏高原东南缘特指以玉树—鲜水河—小江弧形为北部和东部边界,西侧以近南北向实皆断裂带为界所围限的围绕东喜马拉雅构造结的弧形区域(见图2)。该区域的现今地壳活动以发生顺时针旋转变形为主,其中以发育各类次级弧形断裂带和弧形断块为特征,因此,其活动构造体系格局可以用“川滇弧形旋扭活动构造体系”加以概括。该活动构造体系主要由川滇外弧带和滇西内弧带2个次级弧形活动构造区带构成,而每个弧形构造区带都由弧形主边界变形带及其内侧的弧形断块2大部分组成。其中川滇外弧带包括玉树—鲜水河—小江弧形左旋走滑边界变形带及其西侧的雅江—楚雄—景洪断块区;滇西内弧带包括由北西向理塘断裂、近南北向滇西北裂陷带和北向南汀河断裂与畹町断裂等共同构成的理塘—大理—瑞丽弧形左旋走滑边界变形带及其西侧的德钦—保山断块区^[3~4]。该区活动断裂众多,断裂发育密度最大,是我国历史大震发生率最高的区域,有历史记录的特大强震($M \geq 7.0$)多达21次,并且震中位置大多位于活动断裂带(见图2)。

2.3 围空区图像辨识与普适性检验

本研究项目首先利用地震空区方法追溯研究区7级以上的11例大地震(见表1)中涉及到1920年以来的地震,由于当时中国地震台与世界地震台网都还比较稀疏,西藏与青海等西部几乎没有地震台站,因此 $M < 5.0$ 级地震大部分缺失,没有记录。 $M 5.0—M 5.9$ 级以上地震信息较少,但 $M 6.0$ 级以上信息基本齐全。所以1970年之前大地震只选 $M \geq 5.0$ 或 $M \geq 6.0$ 地震作为围空地,对个别近20年以来的地震则部分采用 $M \geq 3.0$ 或 $M \geq 4.0$ 地震,同时数据库展示了中国地震台网的历史地震与仪器地震记录、美国地质调查局(USGS)和全球地震目录的综合信息以及研究区的活动断裂分布图等,确保了数据内容的客观准确性。

针对一个地区断层危险性及地震围空区的分析与辨识,一般遵循以下步骤^[26,36~37]:

①收集和整理研究区活动构造、地震地质等基础资料,编制研究区活动断裂分布图;②在研



川滇外弧带：I-1—玉树—鲜水河—安宁河—则木河—小江-Dien-Bien-Phu 边界变形带；I-2—雅江—楚雄—景洪断块区；
 II 滇西内弧带（中甸—保山弧形扭旋活动构造体系）：II-1—理塘—大理—瑞丽边界变形带；II-2—泸水—保山断块区；
 F1—错那—沃卡裂谷；F2—东喜马拉雅构造结；F3-1—玉树—甘孜断裂；F3-2—鲜水河断裂；F3-3—安宁河断裂；
 F3-4—则木河断裂；F3-5—小江断裂；F4—南汀河断裂；F5—红河断裂；F6—畹町断裂；F7—澜沧断裂—景洪断裂

图2 青藏高原东南缘活动构造体系图及震中分布图（左上角为“川滇弧形旋扭活动构造体系”^①）

Fig. 2 Active tectonic system about the southeastern margin of the Tibetan Plateau and epicenter distribution

究区域内选定地震目录，变换时间段和震级下限做震中分布图，识别可能的地震空区，发现空区时采用逐年区域扫描，做震中分布图，分析空区的形成与解体时间；③寻找对应震例、逼近地震，将空区的形成时间、空区面积、轴长、围空震级等特征值进行量化分析，拟合数学经验公式；④对该区域的震中分布图进行扫描分析，确定环形空区位置，选取一定的拟合数学公式预测未来可能发生大震的区域并大致推算可能发生大震的震级。以上分析步骤虽然简单明了，但如果缺乏数据库的支撑，实际操作起来工作量巨大，在手工操作时，结果实现十分困难，甚至容易出错。特别是信息收集整理、活动构造图的编制、活动构造与地震地质的相关性分析等都费时费力，且直观性不强。但如果借助于活动构造数据建立及系统实现，不仅活动断层危险性分析的全过程都在该系统平台下实现，还极大地提高了工作效率和准确度，可大大避免人工操作的主观性。下面，将对 11 个震例中比较有代表性的察隅地震、当雄地震和汶川地震做简单的分析说明。

① 引自中国地质科学院地质力学研究所吴中海研究员所负责的“青藏高原东南缘重要活动断裂厘定与活动构造体系综合研究”项目成果，由吴中海，周春景，范桃园于 2011 年主编的“中国西南地区主要活动断裂及活动构造体系纲要图”

2.3.1 1950-8-15 M 8.6 察隅地震

该震破裂带分布于喜马拉雅断裂边界逆冲断裂带的阿萨姆—察隅楔形顶角部分,运动形式为逆冲型。该区的历史记载可上溯千年,但该地在此大震发生之前尚未发现历史大震记录。推测已平静至少几百年。该地东南侧缅甸弧北段于1906年曾发生 M 7.0地震,西侧喜马拉雅弧东段于1897年曾发生 M 8.7地震。两者之间的空区长度约426 km,察隅地震破裂的填充带约为300 km。 M 8.6地震与边缘相邻大地震破裂时间差为44~53 a。该区于1923—1950年间形成 $M \geq 6$ 地震环形空区,历时28 a,最后完成包围圈是1948年,距发生大震2 a。面积约27132 km²,围空震平均震级 $\bar{m} = 6.7$ (见图3a)。另外在察隅大地震前几个月缅甸弧附近发生1950-2-2勐连 M 7.0级地震,并在震后20 d在察隅附近(空区内部)发生 M 6.0地震,可能属于察隅大地震前的早期前震活动。

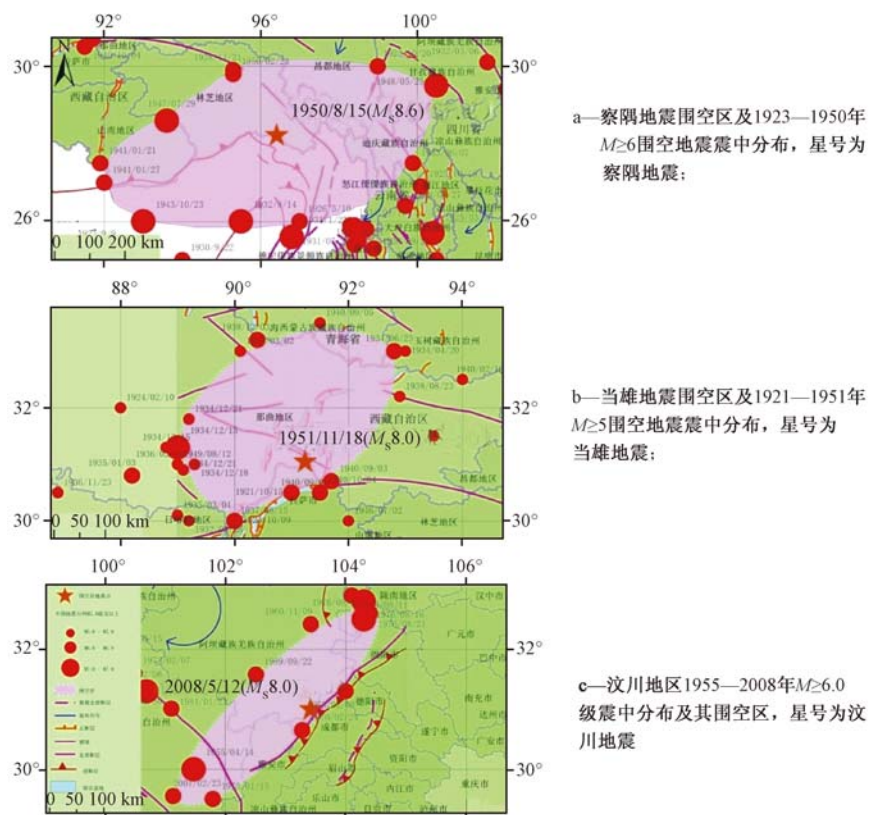


图3 典型震例地震围空区及围空地地震震中分布

Fig. 3 Seismic gap of the typical earthquakes and epicenter distribution

2.3.2 1951-11-18 M 8.0 当雄地震

该震发生在当雄北部、北西向崩错断裂,属左旋走滑型,崩错断裂带无历史大地震记载^[38],其南部羊八井地堑有1411年羊八井8级地震^[39~42]。由于缺少历史记录,断裂带空区情况不明。据历史记载该区1921—1951年 $M \geq 5$ 地震形成环形空区(与察隅地震基本同步),历时31 a,最后的地震围空环活动距发生大震2 a,面积8496 km²,围空地震的平均震级 $\bar{m} = 5.78$ (见图3b)。该震有明确的前震,发生在震前0~1 d内,最大前震 M 6.8。

2.3.3 2008-5-12 汶川8.0级地震

该震位于北东向龙门山断裂带^[43~45],该区1657年和1958年曾发生过6.5和6.2级地

震,从历史文献记载看至少有2000 a未发生过6.5级以上大震。龙门山断裂南端与鲜水河—安宁河断裂交汇点在1786年发生康定 M 7.7大震,但断裂东北端迄今未发生过大震。偏西侧相邻区的虎牙断裂和岷江断裂曾发生1976年松潘7.2级和1933年叠溪7.5级大震,武都的文景断裂发生过1879年8级地震。初步认为在1786年和1879年两大震之间形成空区,时距129~222 a。该区于1955年至2008年4月期间形成 $M \geq 6$ 地震环形空区,历时54 a,最后完成包围圈是2007年,距发生大震1 a,面积约3312 km²,围空地震的平均震级 $\bar{m} = 6.63$ (见图3c)。

2.3.4 历史地震围空区特征值的统计分析

对青藏高原东南缘11例 $M \geq 7.0$ 级大震的围空区数据(见表1)进行统计分析发现,以上大震的围空地震具有明显规律性,最终发震地震的震级与围空区的面积、轴长、持续时间和围空平均震级等参数都有较明显的正相关性,围空时间和平均震级对发震震级有更明显的正相关线性关系,这种近似线性的正相关性无疑可为大震危险性和趋势分析提供重要的参考和借鉴。

表1 青藏高原东南缘历史地震围空区特征值统计

Table 1 The characteristics of history seismic gap around the southeastern margin of the Tibetan Plateau

编号	发震时间	发震断裂	震中位置	纬度	经度	空区名称	M	地震围空区特征参数				
								m	T/a	L/km	S/km^2	$\bar{m}$
1	1950-08-15	喜马拉雅山前主边界逆冲断裂带	察隅	28.24	96.42	察隅	8.6	6	28	426	27367	6.70
2	1951-11-18	崩错断裂带	当雄	31.06	91.24	当雄	8.0	5	31	202	8598	5.78
3	1955-04-14	鲜水河断裂带东南段	康定西南	30.00	101.48	康定	7.5	5	20	167	4019	5.83
4	1970-01-05	峨山—曲江断裂带	通海	24.20	102.68	通海	7.7	6	49	273	7313	6.20
5	1973-02-06	鲜水河断裂带西段	炉霍附近	31.30	100.70	炉霍	7.6	5	21	240	6082	5.69
6	1976-05-29	龙陵—龙新共轭走滑断裂带	龙陵东部	24.50	99.00	龙陵	7.3	5	19	230	8202	5.49
7	1988-11-06	澜沧—景洪断裂带北西段	澜沧北部	22.92	99.79	澜沧	7.4	5	18	222	6809	5.82
8	1995-07-11	勐连断裂带	勐连西部	21.96	99.16	勐连	7.3	3	11	31	215	4.72
9	1996-02-03	哈巴—玉龙雪山东麓断裂	丽江	27.32	100.33	丽江	7.1	3	20	87	637	3.88
10	2008-05-12	龙门山断裂带中段	汶川	31.01	103.42	汶川	8.0	6	54	201	4299	6.63
11	2010-04-14	玉树—甘孜断裂带玉树段	玉树隆宝湖北	33.22	96.59	玉树	7.1	4	25	125	2994	4.10

注: M 为发震震级; m 为围空地震震级起点; T 为围空时间; L 为围空区轴长; S 为围空区面积; $\bar{m}$ 为围空地震平均震级

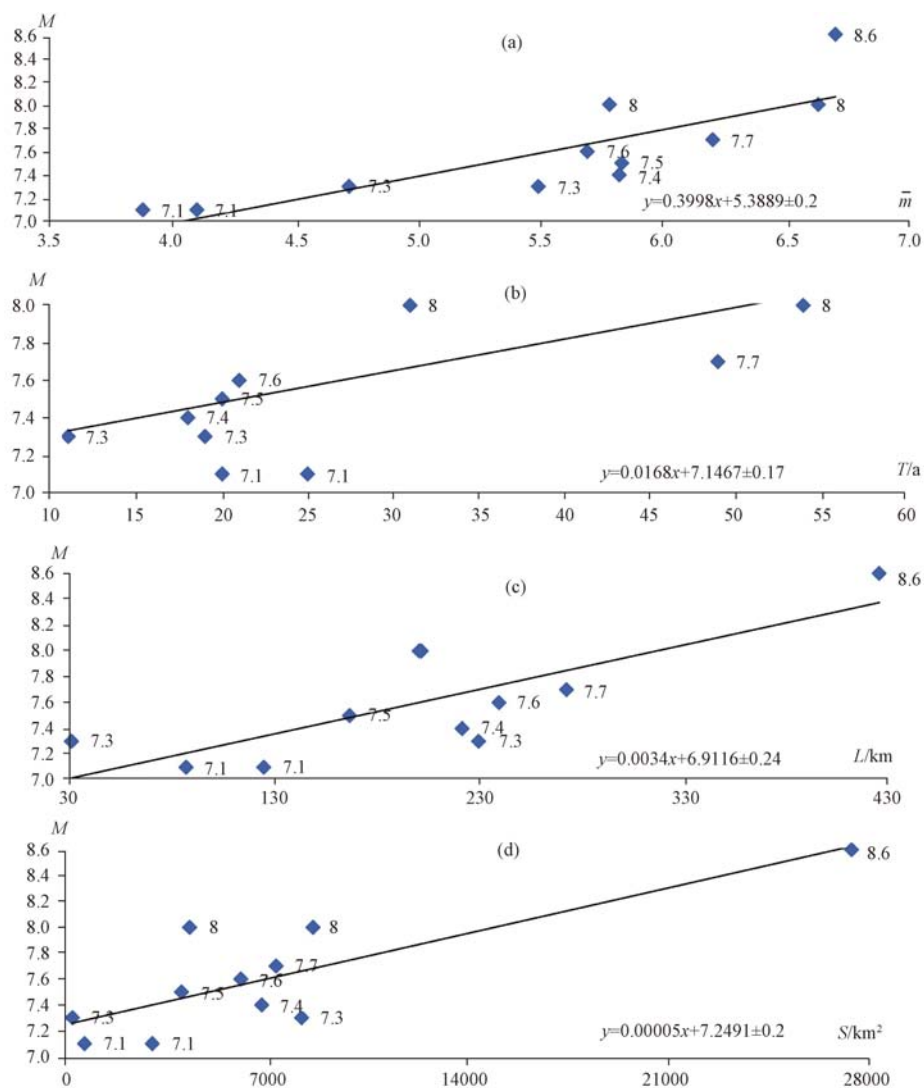
根据统计结果可初步获得几点认识:

①发震震级与围空地震平均震级之间的正相关线性关系最为明显。围空区地震的平均震级随着发震震级的增大递增,回归分析得出两者之间的线性关系为 $y = 0.4x + 5.39 \pm 0.2$ (y 为发震震级, x 为围空地震震级,见图4a);板块内部检验经验公式最大误差0.31,最小误差仅为0.02。察隅8.6级地震发生于板块边界带上,这与板块内部略有差距,误差达到0.53。

②发震震级与围空时间基本上也是正相关关系,随着发震震级增加,围空时间增长,回归分析得出线性公式 $y = 0.0169x + 7.08 \pm 0.17$ (见图4b);其中龙陵地震、玉树地震分别有0.3899和0.306的较大误差,当雄地震误差为0.4437,其他7个地震的误差均较小,最大误差为0.18,最小误差为0.026。

③发震震级与围空区轴长虽然基本上也是正相关关系,但是线性关系不突出,回归分析得出线性公式 $y = 0.003x + 6.91 \pm 0.24$ 的经验公式;最大误差0.41,最小误差为0.21。

④随着发震震级的增加,围空区面积大体上也是增大的,回归分析得出的经验公式为



a—震级 M 与围空区平均震级 $\bar{m}$ 线性关系；b—震级 M 与围空区形成时长 T 线性关系（察隅 8.6 级地震围空时间 T 不参与计算，其震中位置位于板块俯冲边界，地震孕育时间短，与过渡带地震孕育时间模型不一致）；
c—震级 M 与围空区轴长 L 线性关系（汶川地震与当雄地震震级均为 8.0 级、轴长分别为 201 km 和 202 km，所以在图上有重叠）；d—震级 M 与围空区面积 S 线性关系

图 4 发震震级与地震围空区特征值之间关系

Fig. 4 Relationships of earthquake magnitude with the characteristic values of seismic gap

$y = 0.00005x + 7.26 \pm 0.20$ ；最大误差 0.57，最小误差 0.03。

综上所述，最终发震地震的震级与围空区的面积、轴长、时间、围空平均震级等都有着相对一致的正相关关系。对经验公式的总结及验证误差分析可知，线性相关性的拟合度由大到小的顺序分别为：围空时间（ ± 0.17 ）、围空震级（ ± 0.20 ）、围空面积（ ± 0.20 ）、围空轴长（ ± 0.24 ）。

上述震例分析与统计分析结果表明，地震围空区理论在青藏高原东南缘指导大地震危险性分析是具有可行性，并且根据经验公式，可利用地震围空区的围空震级、持续时间、轴长、面积等特征值进行发震震级的估算。

2.4 2013年4月20日四川芦山地震对经验公式的检验

四川芦山7.0级地震，为震源深度10.2 km的逆冲断层型地震，震中区的地震烈度约为9度，主震和余震集中分布于龙门山断层带西南段，位于2008年5月12日汶川地震后的库伦应力增加区域内，且两者震源性质相近，均以逆冲断裂为主，表明该地震与汶川地震有密切关系，也可能是晚期的强余震。区域上看，地震发生在安宁河—则木河断裂围空区的东北端。因此，芦山地震也可是安宁河—则木河地震空区中下一个大地震的前兆性地震。或增加了一个较高级别的围空地震，如果如此，这会使该区未来大地震的震级更大。

鉴于芦山地震发生在经验公式总结之后，笔者针对雅安地区的围空区，进行了公式的再次验证：通过地震目录分析，该区在2000—2012年形成M4.0地震空区（见图5a），面积 $S=4249\text{ km}^2$ ，轴长 $L=166\text{ km}$ ，平均震级 $\bar{m}=4.28$ ，围空时间 $T=12\text{ a}$ ，公式预测发震震级为7.3级大震，最终误差为0.3。但是在2012年10月19日，空区内发生M4.0地震，空区解体，并在该空区北部出现2006—2012年M3.0级及以上地震空区（见图5b），是M4.0地震空区分解成的小空区，面积 $S=328\text{ km}^2$ ，轴长 $L=32\text{ km}$ ，平均震级 $\bar{m}=3.7$ ，围空时间 $T=6\text{ a}$ ，公式预测发震震级为7.1级大震，最终误差为0.1。因此，芦山地震的围空区现象符合前述的统计分析结果，并进一步验证了统计结果的适用性。

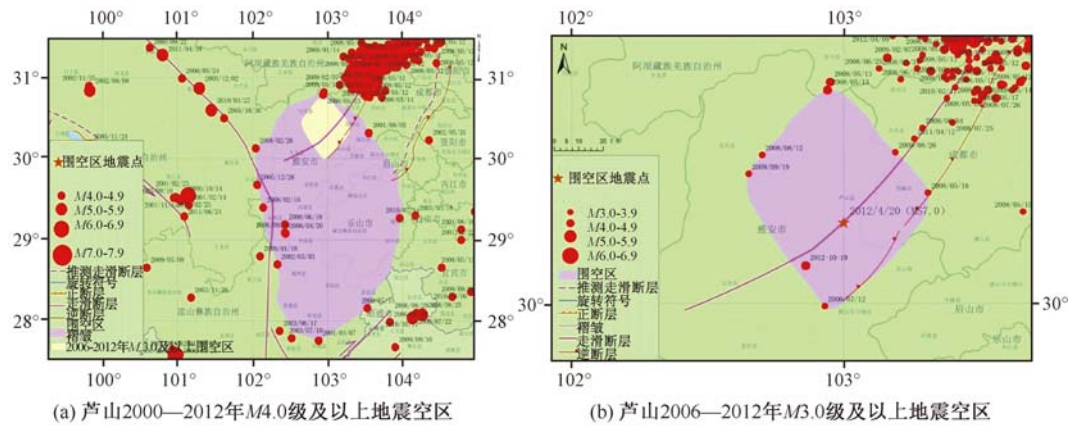


图5 雅安地区2000—2012年地震围空区

Fig. 5 Seismic gaps with different magnitudes in Ya'an area from the year 2000 to 2012

2.5 青藏高原东南缘大地震危险性分析初判

利用以上对当雄、察隅、玉树等11个震例围空区特征分析得出的发生震级与围空区面积 S 、轴长 L 、形成时间 T 以及围空平均震级 $\bar{m}$ 之间的数学经验公式，可对青藏高原东南缘 $M_s \geq 5.0$ 级及以上地震信息进行围空区分析，综合围空区面积 S 、轴长 L 、形成时间 T 和围空震例的平均震级 $\bar{m}$ 等，可进一步推测未来几十年即将发生大震的震级。以初步搭建的青藏高原东南缘活动构造数据库为平台，通过数据库SQL语句查询功能，可实现不同震级、不同时段的地震分布显示，并结合活动断裂展布，采用时间倒推法勾画不同时段，不同震级的地震围空区基本轮廓。青藏高原东南缘是地震频发地区，1950—1955年，1970—1988年经历过2次地震活动高潮，先后发生察隅、通海等大地震。已发生大震的断层目前处于较安全状态，选择围空时段1950—2012年及1970—2012年即可将这些地点排除，突出现今的危险区。最后经过筛选确定1950—2012年M6.0级地震空区、1970—2012年M5.0、M6.0级地震空区、1990—2012年M5.0级地震空区、2005—2012年M5.0级地震空区等4个时

间段,通过逐渐向现今逼近的递推方法展现本研究区的地震围空情况(见图6)。

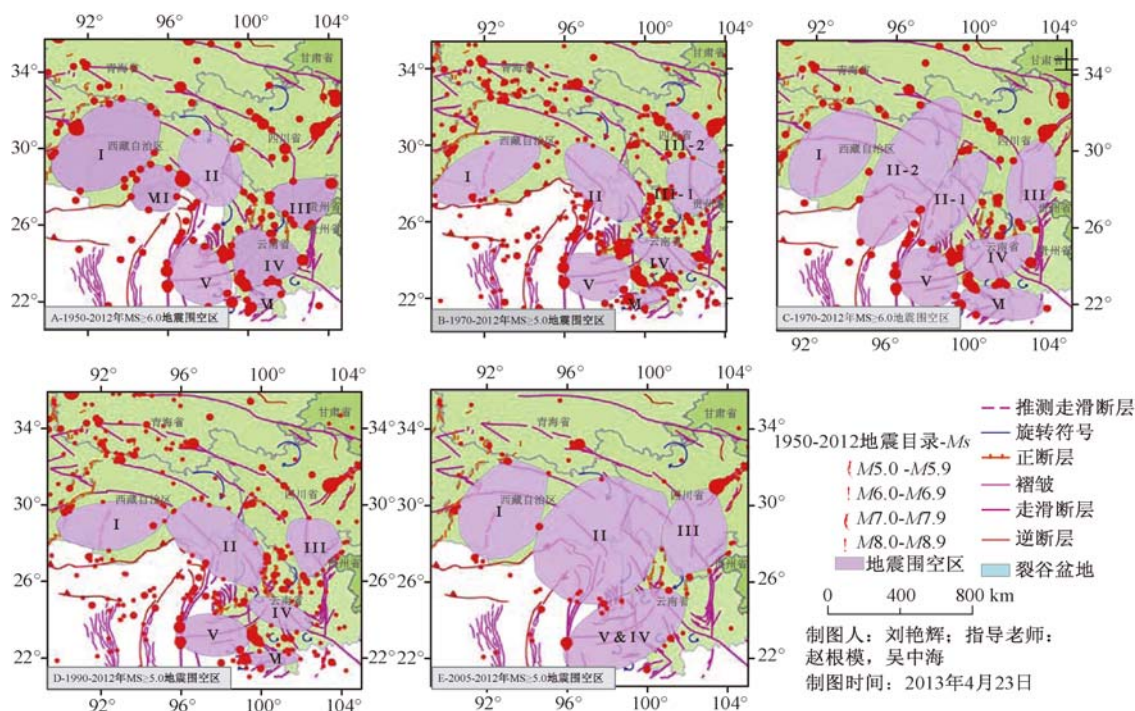


图6 不同时段、不同震级地震围空区预测图

Fig. 6 Prediction maps of seismic gap of different time and earthquake magnitudes

在数据库中对以上围空区进行统计、记录和分析,可得出关于围空区的重要参数,包括:围空区地震数量(N),围空时间(T),围空区预测地震震级(M),围空地震平均震级($\bar{m}$),围空区面积(S),围空区轴长(L);进而针对 T 、 $\bar{m}$ 、 S 和 L 等4个特征参数,利用根据11个震例总结出的经验公式,可估算发震地震的震级,平均误差在 ± 0.2 左右;最后采纳的空区以1990—2012年 $M \geq 5.0$ 级地震显示的6个空区为准,按照I—VI分别编号(见图6,表2),其中不同时期的空区主体位置基本一致,说明几个空区一直稳定存在。

地震围空区分析结果(见图6)清楚地显示,该区从1950年以来,长期存在至少6个显著的地震围空区,其中相对危险的地区应为空区所围限的活动断裂展布地区,并以主要断裂作为地震围空区的命名标准。这6个地震围空区所围限的主要构造或断裂分别是:错那—沃卡裂谷(I);东喜马拉雅构造结(II);安宁河—则木河断裂(III);南汀河断裂、红河断裂(IV);畹町断裂—南汀河断裂(V);澜沧—景洪断裂东段(VI);围空区VII由于是察隅8.6级地震后的余震群围空区,本文不加讨论。笔者对1950—2012年 $M \geq 6.0$ 级地震空区、1970—2012年 $M \geq 5.0$ 、 $M \geq 6.0$ 级地震空区、1990—2012年 $M \geq 5.0$ 级地震空区和2005—2012年 $M \geq 5.0$ 级地震空区等不同时间段、不同震级的地震空区图像进行综合分析,结合表2中的围空区特征参数,可得出如下结论:

①错那—沃卡裂谷空区在1950—2012年、1970—2012年、1990—2012年和2005—2012年等4个阶段,空区均有显示。 $M \geq 6.0$ 围空区在1970—2012年面积缩小了7927 km²,平均震级却明显增大了0.3, $M \geq 5.0$ 地震围空区面积在相应的3个时间段却经历了面积放大、缩小、再放大的动态变化过程,说明此围空区周边现在处于活跃状态,根据公式推算未来可

表2 青藏高原东南缘现今主要地震围空区特征与参数

Table 2 Characteristics and Parameters of present seismic gap around the southeastern margin of Tibetan Plateau

编号	围空区主要 活动构造或断裂	时间段	持续时间	震 级	地震围空区特征					地震围空区发震震级				
					N	$\bar{m}$	T/a	L/km	S/km^2	$M(\bar{m})$	$M(T)$	$M(L)$	$M(S)$	$\bar{m}$
I	错那—沃卡裂谷	1950—2012	1951—2010	6	15	6.51	60	310	18697	7.99	8.15	7.97	8.18	7.82 ± 0.19
		1970—2012	1987—2009	5	11	5.53	23	297	11714	7.60	7.53	7.92	7.83	
		1970—2012	1970—2010	6	12	6.28	41	289	14503	7.90	7.84	7.89	7.97	
		1990—2012	1992—2010	5	10	5.62	19	285	10770	7.64	7.47	7.88	7.79	
		2005—2012	2005—2012	5	15	5.63	8	287	17318	7.64	7.28	7.89	8.12	
II	东喜马拉雅构造结	1950—2012	1950—1989	6	14	6.63	56	225	9793	8.04	8.09	7.68	7.74	7.86 ± 0.28
		1970—2012	1075—2003	5	20	5.38	29	262	10501	7.54	7.63	7.80	7.77	
		1970—2012	1996—2008	6	12	6.41	13	298	9197	7.95	7.37	7.92	7.71	
		1970—2012	1970—2011	6	17	6.28	42	474	22830	7.90	7.85	8.52	8.39	
		1990—2012	1992—2009	5	22	5.47	18	273	13980	7.58	7.45	7.84	7.95	
		2005—2012	2005—2012	5	14	5.38	8	391	33521	7.54	7.28	8.24	8.93	
III	安宁河—则木河断裂带	1950—2012	1952—2008	6	12	6.47	57	145	6076	7.98	8.10	7.40	7.55	7.66 ± 0.16
		1970—2012	1970—2012	5	23	5.43	43	166	6387	7.56	7.87	7.48	7.57	
		1970—2012	1970—2010	5	26	5.46	40	209	4438	7.57	7.82	7.62	7.47	
		1970—2012	1974—2008	6	10	6.38	35	245	8026	7.94	7.73	7.74	7.65	
		1990—2012	1991—2012	5	16	5.59	22	168	6007	7.62	7.52	7.48	7.55	
		2005—2012	2005—2012	5	17	5.64	8	275	11863	7.64	7.28	7.85	7.84	
IV	南汀河断裂东段— 红河断裂沅江段	1950—2012	1951—2009	6	18	6.55	59	213	7676	8.01	8.14	7.64	7.63	7.66 ± 0.18
		1970—2012	1970—2006	5	21	5.63	37	176	3865	7.64	7.77	7.51	7.44	
		1970—2012	1970—2009	6	17	6.54	40	188	6453	8.00	7.82	7.55	7.57	
		1990—2012	1993—2007	5	11	5.43	15	172	3640	7.56	7.40	7.50	7.43	
V	畹町断裂—南汀河 断裂带	1950—2012	1971—2012	6	15	6.51	42	182	7827	7.99	7.85	7.53	7.64	7.69 ± 0.14
		1970—2012	1971—2012	5	19	5.72	42	167	9373	7.68	7.85	7.48	7.72	
		1970—2012	1971—2012	6	12	6.43	41	167	7356	7.96	7.84	7.48	7.62	
		1990—2012	1990—2012	5	16	5.79	23	188	6356	7.70	7.53	7.55	7.57	
IV & V	畹町断裂—南汀河 断裂带	2005—2012	2005—2012	5	20	5.62	8	349	17895	7.64	7.28	8.10	8.14	7.79 ± 0.33
VI	澜沧—景洪断裂东 南段	1950—2012	1950—2007	6	9	6.42	58	101	1671	7.96	8.12	7.26	7.33	7.6 ± 0.23
		1970—2012	1972—2007	5	12	5.44	36	90	1299	7.56	7.75	7.22	7.31	
		1970—2012	1973—2003	6	15	6.55	41	221	5879	8.01	7.84	7.66	7.54	
		1990—2012	1995—2007	5	9	5.76	13	197	1747	7.69	7.37	7.58	7.34	

注： N 为围空地震数量； M 为围空地震震级； T 为围空时间； L 为围空区轴长； S 为围空区面积； $\bar{m}$ 为围空地震平均震级； $M(\bar{m})$ 以 $\bar{m}$ 相关的线性关系推算发震震级，误差 ± 0.2 ； $M(T)$ 以 T 相关的线性关系推算发震震级，误差 ± 0.14 ； $M(L)$ 以 L 相关的线性关系推算发震震级，误差 ± 0.24 ； $M(S)$ 以 S 相关的线性关系推算发震震级，误差为 ± 0.2 ； $\bar{m}$ 为围空区不同时间段汇总的平均震级

能发生 7.82 ± 0.19 级大震，估计在错那—沃卡裂谷中段。

②在东喜马拉雅构造结空区,活动起始于1960年,平静于2008年,围空区面积从 9279 km^2 扩展到 10500 km^2 。但在2005—2012年时间段内,此空区的平均震级有所减小,围空面积却突增到 33521 km^2 ,这一变化非常值得关注。但是由于该区活动断裂研究程度较低,暂时不能准确指出具体的危险断裂,估计在嘉黎—断裂带东段或金沙江断裂带上,这尚待进一步研究确定。根据公式推算,该区未来可能发生 7.86 ± 0.28 级大震。

③安宁河—则木河断裂空区是非常突出的地震围空区,在4个阶段,即1950—2012年 $M 6.0$ 地震空区、1970—2012年 $M 6.0$ 与 $M 5.0$ 地震空区,1990—2012年 $M 5.0$ 地震空区和2005—2012年 $M 5.0$ 地震空区中,该空区的围空现象都比较稳定,并且随着时间的发展,围空面积、围空的平均震级均稳步增长,再结合其构造背景等情况,一致表明该地震围空区是十分危险的,估计在石棉—冕宁—西昌一带或云南巧家地区发生大震的可能性最大,应该作为空区中的重点监测区域。公式推算该区未来可能发生 7.66 ± 0.16 级大震。

④南汀河断裂北东段—红河断裂沅江段空区在1950年、1970年和1990年这3个阶段的围空区预测图中都一直存在,且在不同时间段、不同震级的围空区内,统一出现了轴长、面积和平均震级等变化值的缩小与增大变化,并主要显示向现今推进缩小成负相关关系。该区历史上很少或无6.0级以上地震记录,究竟在哪条断裂带上发震尚有待进一步研究。但从现今断裂的活动性来看,南汀河断裂带发震的可能性更大。根据公式推算,该区未来可能发生 7.66 ± 0.18 级大震。

⑤晚町断裂—南汀河断裂带地震空区在1970年、1990年两个时间段的围空区预测图中一直存在,并在不同时间段、不同震级的围空区内统一出现了面积、平均震级随着时间向现今推进而缩小,呈负相关关系,与空区Ⅳ有很一致的地方,发震断层主要为晚第四纪显著左旋走滑运动为主的北东—近东西向晚町断裂带和南汀河断裂带。公式推算该区未来可能发生 7.69 ± 0.14 级大震。

⑥澜沧—景洪断裂东段地震空区持续于1950—2007年期间,且围空平均震级有增长,其中 $M 5.0$ 地震围空区的平均震级增长了0.32, $M 6.0$ 地震围空区的平均震级增长了0.13,围空面积随同震级分别增长了 448 km^2 和 4208 km^2 ,发震断层估计为北向西澜沧—景洪右旋走滑断裂带的东段(即景洪段),公式估算未来的发震震级为 7.60 ± 0.23 。

⑦Ⅳ&Ⅴ晚町断裂—南汀河断裂带空区:Ⅳ和Ⅴ这2个空区在1950年、1970年和1990年以来的3个阶段的围空区预测图中是独立存在的。但在2005—2012年 $M \geq 5.0$ 级地震围空区中,2个空区间界限消失,形成了一个统一的、更大的围空区,即Ⅳ&Ⅴ围空区,面积为 17895 km^2 ,平均震级为5.62,预测此空区将来发震震级为 7.79 ± 0.33 。

另外,在2005—2012年 $M \geq 5.0$ 级地震围空区中,除了上述的Ⅳ与Ⅴ连成一片外,其他空区也都明显扩大了面积,说明该区2000年以来,平静现象不仅没有结束且日趋加剧,暗示大震正在步步逼近,这一现象值得地震预报与监测工作加以重视。

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 地震围空区分析中的一些问题

数据准确性是公式拟合结果可靠性的最重要前提。在地震数据整理统计过程中发现,美国地质调查局和中国地震台网中心等不同机构的数据存在一定的差异,本文最终以中国地震

台网中心数据为标准。对于历史地震,不同文献记录中也有很多不同,最终以最新出版的全球地震目录为准。由于地震波各向异性、台站方位以及震级测量方法或仪器不同,特别是5.0级以下的地震,不同震级标度之间的关系很复杂,局部时间和局部地区目录中的 M_s 震级(即表面波震级)比 M_L (里氏震级)和 M_b (体波震级)大很多,与经验关系公式相反。本文采用了数据相对较全的 M_s 数据,这对使用 $M < 5.0$ 地震划分空区以及估算发震震级都会带来一些不利的影响,但不会影响到对危险区的判定。同时,在地震围空区特征经验公式总结的过程中,曾经考虑到扩大震级范围有利于拟合可靠性,也对 $M 6.0—M 7.0$ 级的强震进行了实验性统计,但最终平均误差加大了0.2,而且涉及到4.0级以下地震围空区的问题更多,只好暂时放弃。因此,目前只能将围空区识别范围定为 $M 7.0$ 级及以上地震。另外,如果数据条件允许,应该分别对板块边缘、板块过渡带和板块内部等不同构造背景下的地震围空区数据分别进行统计与拟合计算,但由于上述原因,现在的数据资料明显不能满足要求,有待对地震目录进一步厘清核实后再进行,目前尚难以实现这一设想。

3.1.2 地震围空区与断裂活动危险性的关系

现今大地震活动绝大多数发生在活动构造带上,活动断裂带的空间展布情况决定着地震最终发震位置,活动断裂带的活动速率是衡量该地区地块稳定性的一个重要标志。同时地震围空区的分析方法是对地震震中位置分布图与活动断裂展布综合分析的体现,这要求第二类地震围空区要与第一类空区(即活动断裂带上的空段)及活动断裂的活动性紧密结合起来。青藏高原东南缘的东边界主断裂带由鲜水河、安宁河、则木河和小江等4条左旋走滑断裂带组成,是西南地区地震最频繁的活动断裂带^[3~4,46],在该区域内一共发生过14次7级以上大震,而安宁河断裂自1480—1536年后、则木河断裂自1850年后和小江断裂自1833年后,均未发生过 $M_s \geq 7$ 级的地震^[2,41]。南汀河和红河断裂的GPS观察结果显示,该区地壳活动北段最强烈,平均走滑速率为 $2 \sim 3 \text{ mm/a}$ ^[47];澜沧—景洪断裂东段中的景洪段已经历了上千年的大震平静,这些地震围空区与前人研究的活动断裂地震活动空段有重叠部分^[3,6,45]。研究区中的另2个比较突出的危险区:藏南的近南北向错那—沃卡裂谷自1806年错那7.5级地震和1915年桑日 $M_s 7.0$ 级地震之后,均未发生过 $M_s \geq 7.0$ 级及以上的地震^[48],特别是其中段历史上也无6.0级及以上强震记录,但该裂谷的周围已发生了上百次 $M_s \geq 4.0$ 及以上地震;东喜马拉雅构造结本身处于板块过渡带上,地壳极其活跃,但自1950年察隅 $M_s \geq 8.0$ 级地震之后,该地区已60 a以上未发生过 $M_s \geq 7.0$ 级及以上的地震。另外,确定地震围空区中的主要发震断层及其危险性主要取决于该区活动断裂的研究程度,包括:是否所有活动断裂都已被发现和定量研究;是否还有遗漏;对于已识别的活动断层,其活动性如何;距最近一次大地震的离逝时间是多少等。这些都是判断未来是否会发生大震、危险性如何以及究竟能发生多大强度地震等的重要依据。而研究区中的东喜马拉雅构造结地区活动断裂研究资料较少,目前难以对其具体控震断裂或危险断裂给以明确的判断,还需要进一步的深入研究。

3.1.3 活动构造空间数据库在地震围空区分析中效果明显

将活动构造空间数据库应用于地震围空区的分析判别,是在掌握研究区的活动构造体系与历史强震活动背景基础上,以空间数据库为技术平台,对研究区(见图1)最近60 a来震级 $M_s \geq 5.0$ 和 $M_s \geq 6.0$ 地震的活动图像及其时间演变进行系统总结和综合分析。这首先需要建立起强震破裂历史的时—空图像;进而根据重新精定位的地震资料分析沿断裂现代小震活动的时—空分布,并与前期汇总分析的大地震前的地震活动图像进行比较,最后探讨发

生大震的潜势,并估算潜在大震的最大可能震级。根据正在进一步开发的青藏高原东南缘活动构造空间数据库及系统与应用实践,活动构造空间数据库的专业针对性强,操作简单,并可灵活安装应用。因此,通过活动构造空间数据库建设,能够在地震围空区图像分析中取得较好效果,并更好地为开展地震地质工作和活断层危险性动态监测工作服务。

3.2 主要结论

3.2.1 西南地区地震空区现象显著

自1950年至今的63 a中,本区域发生 $M_s \geq 7.0$ 大震共计21次,其中缅甸地区3次地震不做讨论,在剩余18次地震中共计总结出11例大震地震围空区,占地震总数的64.4%。如果排除震中位置位于研究区边界区域而没有研究的东昆仑山和四川松潘等地震对其基数的影响,比例会进一步增加。而且根据报道,东昆仑8.1级地震和松潘7.2级地震都有震前空区,可见地震围空区这一现象在西南地区是非常显著的,利用此方法在本地区进行大地震危险性初判是可行的。

3.2.2 围空区发震震级与围空区平均震级 $\bar{m}$ 和围空时间 T 之间的线性关系明显

通过对研究区11例 $M_s \geq 7.0$ 大震进行震例分析,并对围空区的发震震级与围空区的面积 S 、轴长 L 、形成时间 T 以及围空震例的平均震级 $\bar{m}$ 之间的线性关系进行汇总,可总结出4组经验公式,结果表明,围空区的发震震级与围空区的平均震级 $\bar{m}$ 和围空时间 T 之间的线性关系最为明显。

3.2.3 地震围空区和地震危险区的初判与其中危险断裂的判定

经研究共计发现6处地震围空区危险区,并根据其围空的活动构造或断裂名称加以命名,分别是:错那—沃卡裂谷空区(Ⅰ);东喜马拉雅构造结(Ⅱ);安宁河—则木河断裂(Ⅲ);南汀河断裂、红河断裂(Ⅳ);畹町断裂—南汀河断裂带地震空区(Ⅴ);澜沧—景洪断裂东段(Ⅵ)。其中错那—沃卡裂谷、东喜马拉雅构造结、安宁河—则木河断裂和畹町断裂—南汀河断裂带等周边地区自2005年以来的围空现象更加明显,并且空区已存在几十年,可能处在发生大震的危险边缘。

3.2.4 利用经验公式预测未来区域大震危险区可能发生的大震震级

对预测地震围空区的特征参数进行汇总、分析,以经验公式为指导,预测未来本区域可能发生 $M_s \geq 7.0$ 以上大震。不过发震震级只是粗略估算,由于数据量少,虽然根据公式计算的数值误差为0.16~0.33,但实际的总体误差可能在1.0左右。因此,计算结果只能表明未来大震的震级基本上都在7.0级或以上,具体数值仅作为未来地震预测的参考,也需要相关部门开展更深入的研究。

3.2.5 活动构造空间数据库在地震围空区初判中快速有效

活动构造空间数据库的初步建立与应用研究表明,其时间、空间等属性的存储及其属性查询的实现为地震围空区分析提供了巨大的方便,在数据准确客观的基础上,也保证了分析的客观与时效性。通过对1950—2012年本研究区11个 $M \geq 7$ 级地震的震前空区发育过程进行分析,获得了相应的空区图像,并统计出了时空与强度特征。以此为基础对2012年至未来10~20 a的大地震潜在危险区进行了预测,快速获得了空区图像与数据,并初判了大地震的危险区与震级,同时也检验了本空间数据库系统的运行正常。

最后需要说明的是,地震中长期预测中常用的空区理论虽然在世界很多大震中都得到了可行性验证,并且实践证明,预测的成功率可达80%左右,但是其可靠性不仅强烈依靠地震目录的准确性,同时也取决于对区域活动断裂认知的程度和可靠性。对于活动断裂研究程

度较低的地区,根据地震围空区仅只能粗略地判断出危险区带及发震可能性。但如果围空区中的活动断裂带研究程度高,围空区中主要发震断裂的晚第四纪活动速率、古地震活动过程与破裂段落和距最近一次大地震的离逝时间等信息已知,则可将大震发生的危险区进一步限定到活动断裂的具体段落上,并更好地判断发震的危险性,这样可以显著减少地震短期预报的盲目性,加大地震危险性监测和防震减灾的针对性。目前,鉴于现已发现的地震空区位置的重要性,其中主要发震断层均经历了至少上百年平静,很可能距发震时间已较近,且未来发震的震级可能很大,一旦发生,震中裂度可达9~11度,会造成极大破坏。在其中的关键地区,如石棉—冕宁—西昌—巧家一线、畹町断裂带与南汀河断裂带和澜沧景洪断裂带的景洪段等相关区域的重要城镇,很有必要加强前兆观测和抗震防灾措施,尽最大可能进行短期预报,如在中长期预测阶段采取措施适当,即使短临预报不能实现,也能有效地减少伤亡和损失。同时,地震围空区方法对于未来发生大震的具体位置和时间是无法给予准确预测的,分析结果最好要与 b 值分布、地形变与GPS位移观测以及微宏观前兆异常分析研究等结合起来,可以更好地为地震预测、预报服务。笔者也将利用本平台继续深入开展相关工作,为该区的防震减灾服务。

参 考 文 献

- [1] 国家地震局震害防御司. 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.
The Department of Seismic Hazard Prevention of SSB. Catalog of the history strong earthquakes in China (23 century BC to 1911 AD) [M]. BeiJing: Seismological Press, 1995.
- [2] 唐荣昌,韩渭宾. 四川活动断裂与地震[M]. 北京:地震出版社,1993: 67, 117.
TANG Rong-chang, HAN Wei-bin. Active faults and earthquakes in Sichuan Province [M]. Beijing: Seismological Press, 1993: 67, 117.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 张肇诚. 震例总结研究探讨[M]. 北京:地震出版社,2013.
ZHANG Zhao-cheng. The studies and investigation of seismic cases summary [M]. Beijing: Seismological Press, 2013.
- [6] M7 专项工作组. 中国大陆大地震中长期危险性研究[M]. 北京:地震出版社,2013.
Working Group of M7. Study on the mid- to long-term potential of large earthquakes on the Chinese Continent [M]. Beijing: Seismological Press, 2013.
- [7] 郭安林,张国伟,姚安平. 地质数据库建立中的系统分析[J]. 西北大学学报:自然科学版,2004, 34 (2): 203~206.
GUO An-lin, ZHANG Guo-wei, YAO An-ping. System analysis in building geological database [J]. Journal of Northwest University: Natual Science Editon, 2004, 34 (2): 203~206.

- [8] 郭伟娜, 毛先成, 陈振. 综合地质数据库结构设计与管理软件开发 [J]. 金属矿山, 2009, (6): 136 ~ 139.
GUO Wei-na MAO Xian-cheng, CHEN Zhen. Development of the design and management system of generalized geological database structure [J]. Metal Mine, 2009, (6): 136 ~ 139.
- [9] 张望, 洪金益. 矿产资源空间数据库的分析与设计 [J]. 西部探矿工程, 2009, (6): 127 ~ 131.
ZHANG Wang, HONG Jin-yi. Analysis and design of mineral resource spatial database [J]. West-China Exploration Engineering, 2009, (6): 127 ~ 131.
- [10] 曾卫华. 石油地质空间数据库的建立与应用 [J]. 油气地球物理, 2010, 8 (1): 23 ~ 26.
ZENG Wei-hua. The establishment and application of the geologic spatial database [J]. Petroleum Geophysics, 2010, 8 (1): 23 ~ 26.
- [11] 李永兵, 陈旭瑞, 胡俊峰, 等. 基于 GIS 的地质数据库系统: 研究现状和发展趋势 [J]. 地球物理学进展, 2002, 17 (3): 532 ~ 539.
LI Yong-bing, CHEN Xu-rui, HU Jun-feng, et al. The geologic database system with GIS: Research status in quo and development trend [J]. Progress in Geophysics, 2002, 17 (3): 532 ~ 539.
- [12] 屈春燕. 最新 1/400 万中国活动构造空间数据库的建立 [J]. 地震地质, 2008, 30 (1): 298 ~ 304.
QU Chun-yan. Building to the active tectonic database of China [J]. Seismology and Geology, 2008, 30 (1): 298 ~ 304.
- [13] 李斌, 朱筱敏, 孟昊, 等. 开放性地质空间数据库的设计与应用 [J]. 地理信息空间, 2012, 10 (1): 29 ~ 34.
LI Bin, ZHU Xiao-min, MENG Hao, et al. Design and application of opening geological spatial database [J]. Geospatial Information, 2012, 10 (1): 29 ~ 34.
- [14] Chang Kang-tsung. 地理信息系统导论 [M]. 陈建飞, 译. 北京: 清华大学出版社, 2009.
Chang Kang-tsung. Introduction to Geographic Information Systems [M]. CHEN Jian-fei, translated. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [15] 吴信才. 空间数据库 [M]. 北京: 科教出版社, 2006.
WU Xin-cai. Spatial database [M]. Beijing: Science and Education Press, 2006.
- [16] 杨海军, 邵全琴. GIS 空间分析技术在地理数据处理中的应用研究 [J]. 地球信息科学, 2007, 9 (5): 70 ~ 75.
YANG Hai-jun, SHAO Quan-qin. Consideration on GIS spatial analysis in geospatial data processing [J]. Geo-Information Science, 2007, 9 (5): 70 ~ 75.
- [17] 黄杏元, 马劲松. 地理信息系统概论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
HUANG Xing-yuan, MA Jin-song. Foundation of Geographic Information Systems [M]. Beijing: Higher Education Press, 1990.
- [18] 王学军. 空间分析技术与地理信息系统的结合 [J]. 地理研究, 1997, 16 (3): 70 ~ 74.
WANG Xue-jun. The combination of spatial analysis technique and GIS [J]. Geographical Research, 1997, 16 (3): 70 ~ 74.
- [19] 龚健雅. 空间数据库管理系统的概念与发展趋势 [J]. 测绘科学, 2001, 26 (3): 4 ~ 9.
GONG Jian-ya. Concepts and development of spatial database management [J]. Science of Surveying and Mapping, 2001, 26 (3): 4 ~ 9.
- [20] 程昌秀. 空间数据库管理系统概论 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
CHENG Chang-xiu. Foundation of spatial database management system [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [21] 胡忠宇. 面向对象的全关系型 GIS 空间数据库的研究 [J]. 测绘科学, 2009, 34 (增刊): 118 ~ 120.
HU Zhong-yu. Mensuration method of fixed attitude delay of survey vessel [J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34 (Supp.): 118 ~ 120.

- [22] ESRI. ArcGIS Engine 开发指南 [M]. ESRI 中国(北京)有限公司, 2011.
ESRI. The development guide to ArcGIS Engine [M]. Beijing: ESRI China (Beijing) Co., LTD, 2011.
- [23] Zeiler M. Modeling our world: The ESRI guide to geodatabase design [M]. California: ESRI Press, 1999: 115 ~ 125.
- [24] Cunningham G, Silvertand G. Managing a Versioned Geodatabase [M]. New York: ESRI Press, 2005.
- [25] 邓起东. 断层性状、盆地类型及其形成机制 [J]. 地震科学研究, 1984, (3): 56 ~ 64.
DENG Qi-dong. Fault traits, basin types and their formation mechanism [J]. Earthquake Science Research, 1984, (3): 56 ~ 64.
- [26] 张秋文, 张培震. 地理信息系统在地震危险性分析中的应用 [J]. 地壳形变与地震, 1999, 19 (1): 82 ~ 86.
ZHANG Qiu-wen, ZHANG Pei-zhen. Application of Geographic Information System (GIS) to seismic risk analysis [J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1999, 19 (1): 82 ~ 86.
- [27] 易桂喜, 闻学泽, 范军, 等. 由地震活动参数分析安宁河—则木河断裂带的现今活动习性及其地震危险性 [J]. 地震学报, 2004, 26 (3): 294 ~ 303.
YI Gui-xi, WEN Xue-ze, FAN Jun, et al. Assessing current faulting behaviors and seismic risk of the Anninghe-Zemuhe fault zone from seismicity parameters [J]. Acta Seismologica Sinica, 2004, 26 (3): 294 ~ 303.
- [28] 张国民. 我国地震监测预报研究的主要科学进展 [J]. 地震, 2002, 22 (1): 2 ~ 8.
ZHANG Guo-min. The main science advances of earthquake monitoring and prediction in China [J]. Earthquake, 2002, 22 (1): 2 ~ 8.
- [29] 张国民, 陈章立. 我国地震前兆和预报的探索 [J]. 中国地震, 1987, 3 (增刊): 2 ~ 11.
ZHANG Guo-min, CHEN Zhang-li. Research on the earthquake precursors and prediction of in China [J]. Earthquake Research in China, 1987, 3 (Supp.): 2 ~ 11.
- [30] Mogi K. Two kinds of seismic gaps [J]. Pure and Applied Geophysics, 1979, 117 (6): 1172 ~ 1186.
- [31] Fedotov S A. Regularities of the distribution of strong earthquakes in Kamchatka, the Kurile Islands, and north-east Japan [J]. Tr Inst Fiz Zemli Akad Nauk SSSR, 1965, 36: 66 ~ 93.
- [32] Sykes L R. Aftershock zones of great earthquakes, seismicity gaps, and earthquake prediction for Alaska and the Aleutians [J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 76 (32): 8021 ~ 8041.
- [33] Scholz C H. The mechanics of earthquakes and faulting [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [34] Slemmons D B, Depolo C M. Evaluation of active faulting and associated hazards [C] //Wallace R E. Active tectonics. Washington D C: National Academy Press, 1986: 45 ~ 62.
- [35] 张肇诚, 郑大林, 罗咏生. 《中国震例》前兆资料的初步研究 [J]. 地震, 1990, 10 (5): 9 ~ 24.
ZHANG Zhao-cheng, ZHENG Da-lin, LUO Yong-sheng. Preliminary research on the precursory data from Earthquake Cases in China [J]. Earthquake, 1990, 10 (5): 9 ~ 24.
- [36] 胡聿贤. 工程地震学 [M]. 北京: 地震出版社, 1995.
HU Yu-xian. Engineering seismology [M]. Beijing: Seismological Press, 1995.
- [37] 董治平, 杨立明, 姚军. 青藏高原北部地区地震空区初步研究 [J]. 地震研究, 2005, 28 (1): 6 ~ 11.
DONG Zhi-ping, YANG Li-ming, YAO Jun. Preliminary study on the seismic gap in the northern area of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Seismological Research, 2005, 28 (1): 6 ~ 11.
- [38] 援藏考察队. 当雄地震、察隅地震考察概况 [J]. 四川地震, 1986, 3 (1): 39 ~ 41.
Tibet Expedition Team. An overview of the investigation on Dangxiong and Chayu earthquakes [J]. Sichuan Earthquake, 1986, 3 (1): 39 ~ 41.
- [39] 吴中海, 张永双, 胡道功, 等. 西藏错那—沃卡裂谷带中段邱多江地堑晚新生代正断层作用 [J]. 地质力学

- 报, 2007, 13 (4): 297 ~ 307.
- WU Zhong-hai, ZHANG Yong-shuang, HU Dao-gong, et al. Late Cenozoic normal faulting of the qungdogyang graben in the central segment of the Cona-Qiga rift, southeastern Tibet [J]. Journal of Geomechanics, 2007, 13 (4): 297 ~ 307.
- [40] 吴中海, 张永双, 胡道功, 等. 藏南错那—沃卡裂谷的第四纪正断层作用及其特征 [J]. 地震地质, 2008, 30 (1): 144 ~ 160.
- WU Zhong-hai, ZHANG Yong-shuang, HU Dao-gong, et al. The quaternary normal faulting of the Cona-Qiga rift [J]. Seismology and Geology, 2008, 30 (1): 144 ~ 160.
- [41] 宋治平, 张国民, 刘杰, 等. 全球地震目录 [M]. 北京: 地震出版社, 2011.
- SONG Zhi-ping, ZHANG Guo-min, LIU Jie, et al. Global earthquake catalog [M]. Beijing: Seismological Press, 2011.
- [42] 时振梁, 赵荣国, 王淑贞, 等. 世界地震目录 [M]. 北京: 地图出版社, 1986.
- SHI Zhen-liang, ZHAO Rong-guo, WANG Shu-zhen, et al. The world's earthquake catalog [M]. Beijing: Map Press, 1986.
- [43] 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 等. 2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因 [J]. 地球物理学报, 2008, 51 (4): 1066 ~ 1073.
- ZHANG Pei-zhen, XU Xi-wei, WEN Xue-ze, et al. Slip rates and recurrence intervals of the Longmenshan active fault zone, and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51 (4): 1066 ~ 1073.
- [44] 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川 8.0 地震地表破裂带及其发震构造 [J]. 地震地质, 2008, 30 (3): 597 ~ 629.
- XU Xi-wei, WEN Xue-ze, YE Jian-qing, et al. The M_s 8.0 Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure [J]. Seismology and Geology, 2008, 30 (3): 597 ~ 629.
- [45] 闻学泽, 张培震, 杜方, 等. 2008 年汶川 8.0 级地震发生的历史与现今地震活动背景 [J]. 地球物理学报, 2009, 52 (2): 444 ~ 454.
- WEN Xue-Ze, ZHANG Pei Zhen, DU Fang, et al. The background of historical and modern seismic activities of the occurrence of the 2008 M_s 8.0 Wenchuan, Sichuan, earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 30 (3): 597 ~ 629.
- [46] 闻学泽. 川西安宁河断裂上的地震空区 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38 (7): 797 ~ 807.
- WEN Xue-ze. The seismic gap on the Anninghe fault around the western Sichuan [J]. Science in China Series D: Earth Science, 2008, 38 (7): 797 ~ 807.
- [47] 王琪, 赖锡安, 游新兆, 等. 红河断裂的 GPS 监测与现代构造应力场 [J]. 地壳形变与地震, 1998, 18 (2): 49 ~ 56.
- WANG Qi, LAI Xi-an, YOU Xin-zhao, et al. GPS measurement and present tectonic stress field in the Honghe fault, southwest China [J]. Crustal, Deformation and Earthquake, 1998, 18 (2): 49 ~ 56.
- [48] 吴中海, 叶培盛, 吴珍汉. 2008 年 10 月 6 日西藏当雄 M_s 6.6 级强震的地震烈度控震构造和发震机理 [J]. 地质通报, 2008, 28 (6): 713 ~ 725.
- WU Zhong-hai, YE Pei-sheng, WU Zhen-han. The seismic intensity, seismogenic tectonics and mechanism of the M_s 6.6 Damxung earthquake happened on October 6, 2008 in southern Tibet, China [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 28 (6): 713 ~ 725.

APPLICATION OF SPATIAL DATABASE TECHNOLOGY AND SEISMIC GAP METHOD TO SEISMIC HAZARD ANALYSIS AROUND SOUTH-EASTERN TIBETAN PLATEAU

LIU Yan-hui^{1,2}, ZHAO Gen-mo^{2,3}, WU Zhong-hai¹, LI Yue-hua^{1,2}, MA Dan^{2,4}, JIANG Yao^{1,2}

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

2. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

3. Seismological Bureau of Tianjin City, Tianjin 300201, China;

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

Abstract: Based on the software platform of ArcGIS (invented by ESRI), VS2010, and SQL Server 2008, the spatial database system of the southeastern Tibetan Plateau active tectonic zones that can provide a useful platform for predicting the mid-long term megaseism on active tectonic zones is preliminary established. Taking the study of active faults of southeastern Tibetan Plateau as an example, the research result shows the platform is effective and practical to predict the megaseism. According to the active faults database, 11 cases of the seismic gap's ($M \geq 7.0$) parameters and characteristics classified by time are analyzed. On the basis of the empirical formula, this paper propose preliminary analysis on the development of the seismic gaps ($M \geq 5.0$) data from 1950 to 2012 and comprehensive analysis on the potential hypocenter and magnitude in southeastern Tibetan Plateau in the future. The results show there are six significant potential seismic gaps around the southeastern Tibetan Plateau that confined by Yushu-Xianshuihe-Xiaojiang Fault, including the Cona-Oiga rift zone, eastern Himalayan syntaxis, Xianshuihe-Xiaojiang Fault zone, Nantinghe and Honghe Fault, Wanding fault-Nanting River fault zone, with the eastern segment of the Lancang-Jinghong fault zone being dangerous areas in next few years probably. Combining with the historical seismicity, late quaternary activity of the active faults in seismic gap indicate the forthcoming earthquake prediction should be paid great attention to.

Key words: spatial database; active fault; seismic hazard; seismic gap; earthquake prediction