

Analysis of Influence of Fujian and Taiwan Destructive Earthquake in Quanzhou Area

Hao Guo, Jiansheng Lin, Shanhua Chen, Yuejin Huang, Wenjie Xie, Jianxin Wang, Xinxing Chen, Qun Ouyang

Quanzhou Basic Seismic Station, Earthquake Administration of Fujian Province, Quanzhou Fujian
Email: 68053554@qq.com, fjlinjiansheng@126.com

Received: Nov. 13th, 2015; accepted: Nov. 27th, 2015; published: Nov. 30th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

According to the basic situation of the urban development in Quanzhou, Fujian and Taiwan earthquake tectonic background, earthquake activity and history, and current earthquake survey and observation data, we analyzed basic situation of the main fracture structure between Fujian and Taiwan, the activity time and space distribution characteristics of Fujian and Taiwan earthquake, and the influence of the historical earthquakes in Quanzhou area. The results of the study have certain practical significance and application value for knowing about the influence of Fujian and Taiwan destructive earthquake in Quanzhou area, disaster prevention and seismic trace.

Keywords

Destructive Earthquake of Fujian and Taiwan, Earthquake Tectonic Background, Earthquake Activity, Influence of History Earthquake, Quanzhou Area

闽台破坏性地震对泉州地区的影响分析

郭 皓, 林建生, 陈珊桦, 黄跃进, 谢文杰, 王建新, 陈新兴, 欧阳群

福建省地震局泉州基准地震台, 福建 泉州
Email: 68053554@qq.com, fjlinjiansheng@126.com

收稿日期: 2015年11月13日; 录用日期: 2015年11月27日; 发布日期: 2015年11月30日

文章引用: 郭皓, 林建生, 陈珊桦, 黄跃进, 谢文杰, 王建新, 陈新兴, 欧阳群. 闽台破坏性地震对泉州地区的影响分析[J]. 自然科学, 2015, 3(4): 247-261. <http://dx.doi.org/10.12677/ojns.2015.34030>

摘要

根据泉州地区城市发展的基本概况、闽台地震构造背景与地震活动性、历史及现今地震的调研与观测资料, 研究与分析闽台主要断裂构造的基本概况、闽台地震活动时间与空间的分布特征及历史地震对泉州地区的影响。有关研究结果对认识闽台破坏性地震对泉州地区的影响, 以及对做好震灾预防和震情跟踪等方面具有一定的现实意义与实际的应用价值。

关键词

闽台破坏性地震, 地震构造背景, 地震活动性, 历史地震影响, 泉州地区

1. 引言

泉州市是我国东南沿海经济较发达和人口密集的地区之一, 区域范围: 北纬 $24^{\circ}22'$ ~ $25^{\circ}56'$ 、东经 $117^{\circ}34'$ ~ $119^{\circ}05'$, 市区中心地理位置为: 北纬 $24^{\circ}54'$ 、东经 $118^{\circ}36'$ 。泉州及其附近地区历史上曾发生过多次破坏性地震, 例如 1604 年泉州海外 $7\frac{1}{2}$ 级大震的影响烈度达到 VIII 度, 以及 1907 年泉州 5 级、963 年泉州与 1538 年晋江安海 $4\frac{3}{4}$ 级等地震, 近期泉州附近地区亦曾先后发生过 1995 年晋江海域 5.3 级、1999 年惠安海外 4.8 级等多次破坏性地震, 由于泉州附近地区位于北北东 - 北东向长乐 - 诏安断裂带与北西向永安 - 晋江断裂带的交汇地段, 近期中小震活动活跃且构造上存在发生 6 级左右中强地震的背景条件, 同时本省沿海地区紧邻环太平洋地震带中地震活动最活跃的台湾地震带, 一些发生在台湾海峡及台湾地震带的大震亦使泉州地区成为其在海峡西岸地震波及较大的地区之一, 例如近年 1994 年台湾海峡南部 7.2 级、1999 年台湾南投 7.4 级以及 2006 年台湾恒春海域 7.4 级等大震, 泉州地区震感明显, 目前随着城市建设的加速发展及沿海等地已形成人口密集的城市群, 研究与泉州地区关系密切的闽台地震对泉州地区的可能影响是泉州市城市建设中人们关注的热点问题。为此本文根据闽台地震构造背景与地震活动性、历史及现今地震的调研与观测资料, 研究闽台主要断裂构造的基本概况、闽台地震活动的时空特征及其历史地震对泉州地区的影响, 有关研究对提高泉州地区震灾预防、震情跟踪及城市防震减灾综合防御能力等方面具有一定的现实意义和实际的应用价值。。

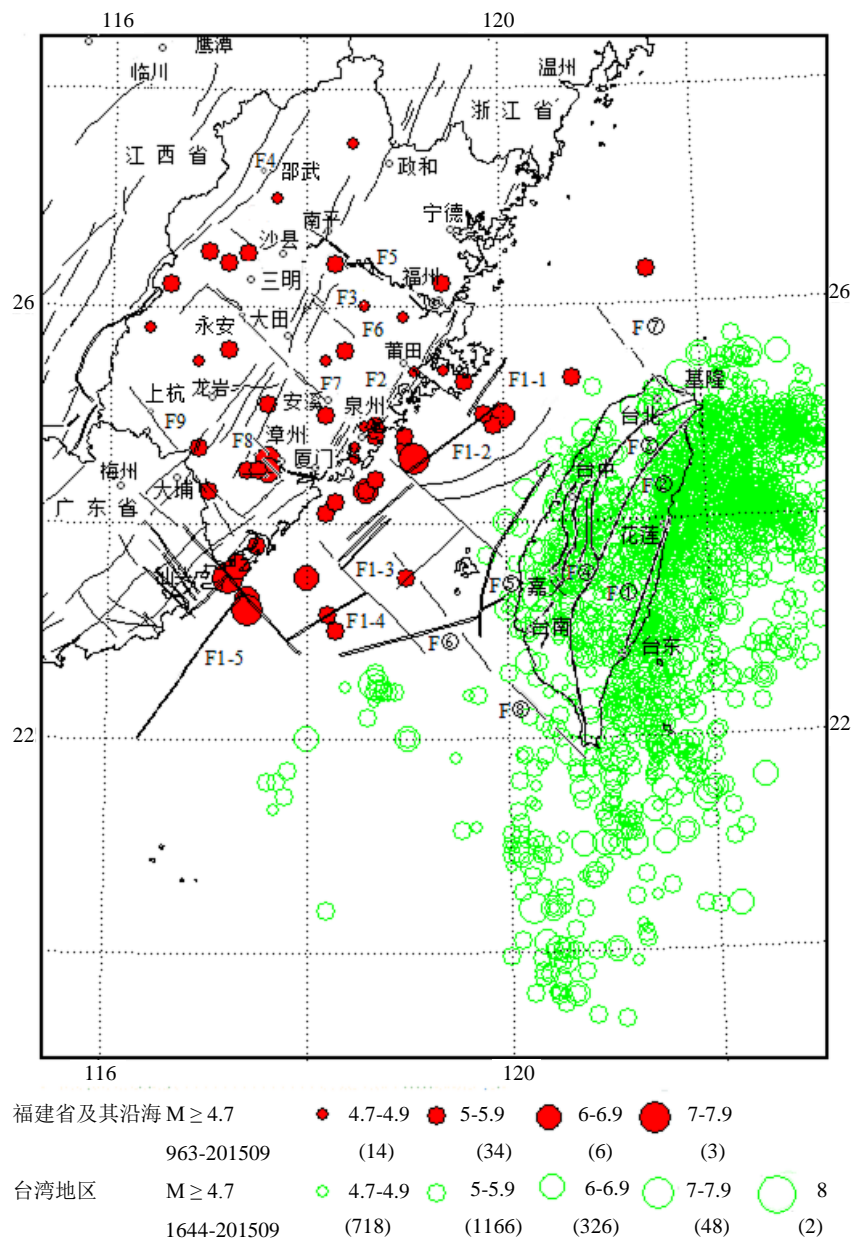
2. 闽台主要断裂构造的基本概况

2.1. 福建及其沿海地区主要断裂构造的基本概况

断裂构造是区内最主要的构造形式, 区域内的断裂构造主要有北北东-北东向断裂带、北西向断裂带和近东西向断裂带, 其中北北东 - 北东向和北西向两组活动断裂最为发育(图 1)。

区域内北北东 - 北东向断裂带规模较大, 纵贯全区, 断裂带的形成年代由西向东逐渐变新, 并呈多期活动性, 地震活动强度也由西向东逐渐变强, 尤其是在晚第四纪时期有强烈活动的滨海断裂带是本区域强震发震构造。区域内的北北东 - 北东向的主要断裂带, 自东向西依次为:

滨海断裂带(F1): 该断裂带受北西向断裂的分割作用, 在区域内分五段由多条呈斜列状排列的断层组成, 其中: 平潭海外断裂段(F1-1)历史上曾发生 1517 年平潭 5 $\frac{1}{2}$ 级地震; 泉州海外断裂(F1-2)历史上曾发生 1604 年泉州海外 $7\frac{1}{2}$ 级地震; 金门海外断裂(F1-3)历史上在该断裂带附近曾发生 1906 年 $6\frac{1}{4}$ 、 $5\frac{1}{2}$ 、 $5\frac{1}{4}$ 级 3 次厦门海外地震; 东山海外断裂(F1-4) 1878 年、1972 年和 1995 年在该断裂附近曾分别发生 $6\frac{1}{2}$ 级、5.1 级和 5.0 级地震; 南澳海外断裂(F1-5) 1600 年和 1918 年曾分别发生了 7 级和 7.3 级南澳海外地震。



福建省及沿海地区：F1：滨海断裂带，F2：长乐-诏安断裂带，F3：政和-海丰断裂带，F4：邵武-河源断裂带，F5：闽江断裂带，F6：沙县-南日岛断裂带，F7：永安-晋江断裂带，F8：九龙江断裂带，F9：上杭-云霄断裂带；台湾地区：F①：花东纵谷断裂带，F②：梨山断裂带，F③：屈尺-老浓-潮州断裂带，F④：台西山麓断裂带，F⑤：台湾海峡东侧断裂带，F⑥：义竹断裂带，F⑦：宁德-(台湾)三貂角断裂带，F⑧：澎湖-七星岩断裂带。

Figure 1. Distribution of the main fault structure and $M \geq 4.7$ earthquake epicenter in Fujian and Taiwan areas (Fujian province and its coastal areas, from 963-2015.09; Taiwan area from 1644-2015.09)

图 1. 闽台地区主要断裂构造和 $M \geq 4.7$ 级地震震中分布图(福建省及其沿海, 963-2015.09; 台湾地区, 1644-2015.09)

长乐-诏安断裂带(F2)：该断裂呈北东向平行海岸线展布，历史上曾发生 1574 年福州-连江之间的 5 $\frac{3}{4}$ 级、1937 年莆田 4 $\frac{3}{4}$ 级、1607 年泉州湾 5 $\frac{1}{4}$ 级、1907 年泉州 5.0 级、1934 年安溪 5 $\frac{3}{4}$ 级以及 963 年泉州、1596 年惠安西南、1538 年和 1691 年晋江安海等 4 次 4 $\frac{3}{4}$ 级地震。

政和 - 海丰断裂带(F3): 位于福建中部, 展布于政和、南平、大田、龙岩东等地, 向西南经广东省大埔至海丰等地, 区内沿断裂带发生过多次 5 级左右地震, 如 1067 年南平东南 5¼ 级、1832 年平和西 5 级、1940 年永定 5¼ 级、1968 年华安 5.2 级等地震等。在断裂南段的龙岩、华安、大田等地有现今小震活动。

邵武 - 河源断裂带(F4): 北起闽赣分水关以北, 经福建的武夷山、邵武、宁化进入江西石城、会昌、寻乌, 往西南延伸至广东河源、东莞一带。断裂带中、南地段发生过多次 4¾~6 级地震活动, 其中福建地段沿断裂带发生过 1651 年宁化 5½ 级和 5 级、1535 年长汀 4¾ 级、1797 年邵武 4¾ 级等地震, 与福建交界的江西地段在会昌、寻乌一带中强地震相对集中。

区内规模较大的北西向断裂, 近乎呈等间距斜贯全区, 这些断裂带在与北东向断裂交汇形成的断陷盆地、平原和海湾处, 断裂活动性明显, 往往是中强地震发生的部位。区域内北西向的主要断裂带, 自北向南依次为:

闽江断裂带(F5): 断裂形迹大致沿闽江南北岸分布, 主要形迹见于南平、闽清和福州一线, 该断裂与北北东 - 北东向长乐 - 诏安断裂带交汇的福州断陷盆地周边断裂历史上曾发生 1574 年福州 - 连江之间的 5¾ 级地震。

沙县 - 南日岛断裂带(F6): 断裂断续展布于沙县、尤溪南、至莆田南日岛, 历史上曾发生 1544 年德化 5¼ 级和 2013 年仙游 4.8 级地震(两地震相距约 40 公里)。

永安 - 晋江断裂带(F7): 断裂断续展布于清流、永安、安溪、南安、泉州一带, 大致沿晋江中下游分布, 该断裂控制着泉州断陷平原和海湾的展布, 断裂东南段比西北段地震活跃。该断裂与北北东 - 北东向长乐 - 诏安断裂带交汇部位(安溪至泉州湾附近)历史上曾发生 963 年泉州 4¾ 级、1567 年泉州海外和 1607 年泉州湾 5¼ 级、1609 年泉州海外 5¾ 级、1907 年泉州 5 级、1934 年安溪 5¾ 级等 6 次 $M \geq 4¾$ 级地震。

九龙江断裂带(F8): 沿九龙江北溪、西溪、漳州、龙海一线展布, 向东经厦门岛南面入海。该断裂西北段比东南段活动性强, 历史上在漳州曾发生 1067 年 5¼ 级、1185 年 6½ 级和 1445 年 6¼ 级地震, 在漳州东南曾发生 1601 年 5¼ 级地震, 现今小震活跃。

上杭 - 云霄断裂带(F9): 该断裂带展布于上杭、永定、云霄、东山一带, 1940 年在永定东南发生过 5¼ 级地震。

泉州地区位于北北东 - 北东向长乐 - 诏安断裂带中段与北西向永安 - 晋江断裂带交汇地段, 历史上泉州及其附近的惠安、安溪、晋江安海等地曾发生过 4¾~5¾ 级地震, 其中最大为 1934 年安溪 5¾ 级地震。

上述断裂带中对泉州地区地震影响较大的断裂构造主要有: 活动时代属第四纪全新世的北北东 - 北东向滨海断裂带的泉州海外段(F1-2)、金门海外段(F1-3)、南澳海外段(F1-5), 晚更新世仍有活动的北北东 - 北东向长乐 - 诏安断裂带和北西向的闽江断裂带东南段、永安 - 晋江断裂带东南段和九龙江断裂带西北段, 其中北北东 - 北东向断裂规模较大, 尤其是滨海断裂带是区域内的强震发震构造。历史上对泉州地区地震影响较大的 7 级以上大震均发生在滨海断裂带上。

2.2. 台湾地区主要断裂构造的基本概况

台湾地区是西太平洋地震带上地震活动最强烈的地段之一, 构造上属菲律宾板块与欧亚板块碰撞地带的特殊部位。

台湾地区断裂发育, 以北北东向断裂为主, 其中北北东 - 北东向的主要断裂带自东向西主要有(图 1):

花东纵谷断裂带(F①): 台东纵谷是欧亚大陆板块东南缘与菲律宾海板块西北角之间的构造缝合带[1], 历史上其地震活动强度大、频度高, 多次发生 7 级以上地震, 最大震级达 8 级。

梨山断裂带(F②): 沿断裂发生过多次 5~6.9 级地震。

屈尺 - 老浓 - 潮州断裂带(F③): 该断裂北段发生 1909 年台北 7.3 级地震, 中、南段 5~6.9 级地震活

动频繁。

台西山麓断裂带(F④): 由多条平行的逆掩推复构造组成, 沿断裂发生 1935 年苗栗 7.1 级、1941 年嘉义南 7 级、1964 年台南 7 级及 1999 年南投 7.4 级和 7.0 级等多次 7~7.5 级地震。

台湾海峡东侧断裂带(F⑤): 海峡东侧断裂全长 350 Km, 沿断裂发生过 2 次 6~6.9 级地震, 3 次 5~5.9 级地震。

义竹断裂带(F⑥): 由台湾义竹的西南方向进入台湾海峡, 该断裂带附近的台湾浅滩南侧 1994 年发生了台湾海峡南部 7.2 级地震, 断裂带东北端发生过多次 5~6.9 级地震。

由福建沿海横穿台湾海峡到台湾附近海域的北西向规模较大的断裂带自北向南主要有(图 1):

宁德 - (台湾)三貂角断裂带(F⑦): 该断裂东南段及其两侧第四纪以来地壳活动强烈, 发生过多次 6~7 级地震[2]。

澎湖 - 七星岩断裂带(F⑧): 位于台湾岛西南海域, 其东南端延伸到台湾岛以南近海的七星岩, 沿断裂带东南段发生一系列 5~5.9 级地震, 以及 2006 年恒春 7.4 级和 7.1 级地震。

与北北东 - 北东向断裂一样, 北西向断裂为海域内重要的一组断裂。北东向断裂以压剪性断裂为主, 北西向断裂以张性断裂为主。

3. 闽台地震活动性分析

3.1. 地震区(带)的划分

根据《中国地震动参数区划图》地震区、带划分方案[3], 泉州地区位于华南地震区的华南沿海地震带北段内, 其地震危险性主要来源于华南沿海地震带的地震活动影响。华南沿海地震带包括东南沿海、东海南部、台湾海峡西部及南海北部。台湾地震区的西部地震带位于纵谷以西地区, 包括台湾海峡东部及台湾岛大部分地区; 台湾东部地震带包括纵谷断裂带在内的以东地区。

3.2. 闽台地区破坏性地震资料的选取

破坏性地震为震级 $M \geq 4.7$ 的地震, 其震级 M 为面波震级 M_s , 破坏性地震资料是研究闽台地震对泉州地区地震影响的基础资料, 福建省和台湾地区有历史记载并能确定地震参数的破坏性地震分别始于 963 年和 1644 年, 其中 963~1911 年和 1912~1990 年的地震目录引用国家地震局震害防御司分别于 1995 年编制的《中国历史强震目录》(公元前 23 世纪-公元 1911 年)[4]和 1999 年编制的《中国近代地震目录》(公元 1912 年至 1990 年 $M \geq 4.7$) [5], 1990 年以后的地震目录引用《中国地震台网(CSN)地震目录》[6], 并引用袁定强等对福建省历史强震目录的有关复核结果[7]。考虑到对市区影响较大的地震, 区域范围向南适当扩大, 包括了 1918 年广东南澳 7.3 级地震和 1600 年广东南澳海外 7.0 级地震, 结果表明: 福建省及其邻近沿海 963~2015 年 9 月共记载到 $M \geq 4.7$ 级地震 57 次(图 1), 最早的破性地震记录是 963 年泉州 4 $\frac{3}{4}$ 级地震, 3 次 7.0~7.9 级大震均发生在海域, 其中震级最大的为 1604 年泉州海外 7 $\frac{1}{2}$ 级地震; 台湾地区(包括台湾东、西部地震带) 1644~2015 年 9 月共记载到有 $M \geq 4.7$ 级地震 2260 次(图 1), 其中震级最大的为 1920 年 6 月 5 日台湾大港口东和 1972 年 1 月 25 日台湾火烧岛以东海域的两次 8 级地震。

3.3. 闽台地震活动特征

3.3.1. 地震活动特征的空间分布特征

1) 在震中分布特征方面(图 1):

福建及其沿海地震按北东向和北西向活动断裂组成的构造格局成带状分布、破坏性地震主要集中在台湾海峡和东南沿海地区, 北东向的滨海断裂带、长乐 - 诏安断裂带、政和 - 海丰断裂带以及邵武 - 河

源断裂带附近,北西向九龙江断裂带、南澳海外和台湾海峡南缘浅滩等地,特别是北东与北西向两组断裂交汇部位,在海域及沿海地区成带性尤其明显。地震活动总体呈现出从西北往东南、由内陆向海域逐渐增强的趋势。由于沿海地区地震活动频度或强度都远远高于、强于内陆地区,地震活动分布总体趋势为东强西弱,南强北弱,其中闽江断裂带以南地区远比以北地区地震活动活跃,并以沿海地区的莆田-东山地段(包括与广东邻近的沿海区域)的地震活动最为突出,历史上曾发生 7.0~7.9 级地震 3 次(1600 年南澳 7 级、1604 年泉州海外 7½ 级和 1918 年南澳 7.3 级),6.0~6.9 级地震 6 次(1185 年漳州 6½ 级、1445 年漳州 6¼ 级、1878 年东山海外 6½ 级、1881 年泉州海外 6 级、1906 厦门海外 6¼ 级和 1921 年广东南澳 6.2 级),5 级左右地震 34 次,区域地震台网记录的现代地震分布格局与历史破坏性地震的空间分布大致相同。

台湾地区是环太平洋体系的地震活动带,为我国地震活动性最高的地区,其中:台湾东部地震带的地震主要沿北东向断裂带分布,破坏性地震震中分布密集、强度大、频度高,但大震震中在陆地上少,在海上的多,历史上 1920 年和 1972 年的两次 8 级地震都发生在东海岸近海海底(距泉州市区中心距离分别为 446 km 和 458 km);台湾西部地震带的地震活动性比东部低,地震的频度与强度亦比东部小,历史上未曾有过 8 级地震,一些 7 级以上地震主要分布在台湾岛上的山区与平原交界地区,余震较频繁,对岛内影响范围较广,造成灾情较重;近年西部地震带的 1994 年台湾海峡南部 7.2 级地震对福建沿海产生了较明显影响。

2) 在震源深度分布特征方面:

福建省及其邻区地壳深度从西到东为由深到浅,震源深度分布则由西往东逐渐加深,一般震级越大震源深度也相应有所增加,其中:闽西、赣东南地区的震源深度分布一般在 10 km 以内,龙岩-漳平一带为 10~15 km,沿海的漳州-厦门-东山地区震源深度 15~20 km 居多[8]。福建南部地区平均震源深度在沿北东方向展布基础上,还受到北西向断裂控制,断裂构造通过的地区平均震源深度相对较深,东山-莆田地区地震最大震源深度为 20~30 km,龙岩-漳平-漳州地区地震最大震源深度为 15~25 km,福建其他地区大部分地震最大震源深度 < 15 km [9]。对泉州地区地震影响较大的华南沿海地震带的地震震源深度一般较浅,属地壳中上层的浅源构造地震。据福州-泉州-汕头人工爆破地震剖面[10],研究区内地壳具有大陆型向海洋型过渡的特点,地壳平均厚度 30 km,由海洋向陆地逐渐增厚,其中上地壳 1.5~4 km;中地壳平均 15 km,其下部存在一低速层,部分中强震及大部分弱震分布在此层;下地壳平均 12 km,大部分中强震,小部分弱震分布在此层。如取中地壳的代表深度为 10 km,下地壳的代表深度为 20 km,并结合近期弱震分布主要在 20 km 范围内,中国地震动参数区划图[1]华南地区平均震源深度取 10 km 等分析可见对泉州地区影响较大地震主要震源深度优势分布在 10~20 km 范围内较为合理[11]。

台湾西部地震带震源深度浅(约 10 余公里);东部地震带震源较西部地震带为深,包括了浅源和中源地震两部分,一般由台湾岛向东边海域震源逐渐加深,台湾地区震源深度较深的地震大部分发生在台湾东北部海域。

3.3.2. 地震活动的时间分布特征

华南沿海地震带是华南地震区地震活动最强的地震带,对泉州地区的地震危险性主要来源于该带北段地震活动的影响。由震级(M)与时间(T)的关系图(图 2(a))可见:华南沿海地震带的地震活动在时间上是不均匀分布的,该地震带自 1400 年以来随时间的进程经历了两个地震集中活动的活跃期和无强震活动的相对平静期,其中第一活跃期为 1507~1695 年,历时约 188 年,大震集中在 1600 年~1611 年之间,其间连续发生了 1600 年南澳 7 级、1604 年泉州海外 7½ 级和 1605 年琼山 7½ 级地震;第二活跃期为 1778 年至今,其中活跃期为 1871 年至今,至今已经历了 144 年,目前该活跃期地震主要分布在 1875~1895 年、1918~1935 年的两个阶段,其间发生了 1918 年南澳 7.3 级和 17 次 6~6.9 级地震。这两个活跃期间地震活

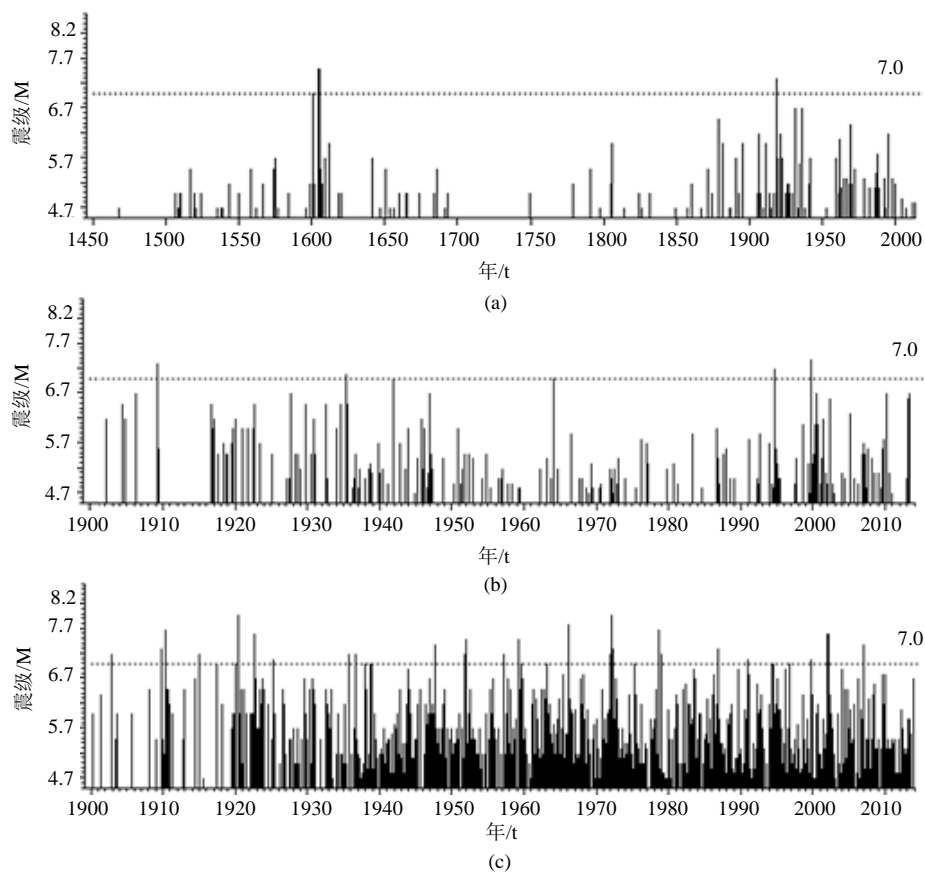


Figure 2. Earthquake sequence M-t chart ($M \geq 4.7$): (a) South China coastal seismic belt; (b) Western Taiwan seismic belt; (c) Eastern Taiwan seismic belt

图 2. 地震序列 M-t 图($M \geq 4.7$): (a) 华南沿海地震带; (b) 台湾西部地震带; (c) 台湾东部地震带

动特点表现为频度高、强度大、能量释放高度集中，目前仍处于第二活跃期的后期阶段，中强地震活动还将持续几十年，泉州地区未来应考虑其可能存在的影响。

台湾地区自 1644 年开始有地震记载，大约从 1900 年起 5.0 级以上的地震记录才相对完整，其东、西部地震带破坏性地震亦一直很活跃。从有限的时间段上，台湾西部地震带自 1900 年以来可大致划分为两个活跃期(图 2(b))，即：1916~1947 年和 1990 年至今，目前仍处于后一活跃期内。台湾东部地震带自 1900 年以来可大致划分为五个活动期(图 2(c))，即：1901~1922 年、1923~1951 年、1952~1975 年、1976~1998 年和 1999 年~至今，目前仍处于第五个活动期内。

4. 历史地震对泉州地区的影响

泉州市历史上既是一个地震多发地区又是一个古迹众多的文化名城，大量经历了历史地震考验并保存至今的古建筑和及其史料记载为人们今天研究历史地震对泉州地区的影响提供了重要的基础资料。本章根据史料记载、等震线资料的搜集、历史地震考证、地震烈度衰减关系、地震仪器记录等方面的分析、计算与复核来研究历史地震对泉州地区的影响。

4.1. 历史地震史料记载情况

为了解历史地震对泉州地区的影响，本文将历年破坏性地震对泉州及周边市、县产生了地震影响的

历史记载[4]-[8]¹列于表 1, 表中可见泉州地区地震历史资料丰富, 已有一千多年的历史地震记载史, 历史记载较为完整, 其中对泉州等地有破坏性影响记载的地震分别为: 963 年 5 月泉州 4¾级、1538 年 10 月晋江安海 4¾级、1596 年 10 月惠安洛阳 4¾级、1604 年 12 月 29 日泉州海外 7½级、1607 年 8 月泉州湾 5¼级、1609 年 6 月 7 日泉州海外 5¾级、1691 年 5 月晋江安海 4¾级、1907 年 10 月 15 日泉州湾 5 级、1918 年 2 月 13 日广东南澳 7.3 级等地震。

4.2. 破坏性历史地震等震线资料

据史料记载, 对泉州市区造成≥VI度地震影响且有历史地震等震线资料的地震共有 3 次, 其分别为:

1) 1604 年 12 月 29 日泉州海外 7½级地震, 距泉州市中心(北纬 24.90°, 东经 118.60°)的距离约为 60.5 km。1994 年中国地震局地球物理研究所等单位在完成惠安核电厂厂址地震安全性评价报告时², 曾对该次地震的历史资料和地震参数(震中位置与震级)进行过详细调查与复核, 该地震等震线图(图 3)的复核结果表明泉州中心市区场地的影响烈度为Ⅷ度。

2) 1906 年 3 月 28 日厦门海外 6¼级地震, 距泉州市中心距离约为 66.7 km。泉州记载不祥, 南安、惠安史料未记载, 根据国家地震局震害防御司 1995 年编制的《中国历史强震目录》(公元前 23 世纪-公元 1911 年) [4]的等震线图(图 3), 泉州中心市区场地的影响烈度为Ⅶ度。

3) 1918 年 2 月 13 日广东南澳 7.3 级地震, 距泉州市中心距离约为 224.7 km。根据中国地震局震害防御司 1999 年编制的《中国近代地震目录》(公元 1912 年~1990 年 $M \geq 4.7$) [5]的等震线图(图 3), 泉州中心市区场地的影响烈度为Ⅶ度, 根据历史地震资料记载, 该地震泉州市区场地的影响烈度高达Ⅶ度, 属地震影响烈度高异常区。

4.3. 历史地震影响烈度的复核与计算

为估计破坏性地震对泉州地区的影响烈度, 对于历史记载较少且无等震线资料和可能产生≥VI度地震影响烈度的历史地震, 采用汪素云等[12]拟合得到的华南地区地震烈度平均轴衰减关系计算地震对场址可能产生的影响烈度, 其表达式如下:

$$I = 1.610 + 1.640M - 1.388\ln(R+12) \quad S = 0.531$$

式中: I 为计算烈度值, M 为震级, R 为震中距离(km), S 为标准差。考虑到上述衰减关系的标准差, 对计算值进行综合评定, 计算得到的影响烈度及其归整值见表 2。

4.4. 历史地震影响烈度的综合分析

4.4.1. 对市区场址影响烈度 ≥ VI 度地震的分析

通过对历史地震的史料记载、等震线图分析及衰减关系的计算结果, 得到历史上对市区场址影响烈度 ≥ VI 度的地震共 7 次(见表 3), 其中最大影响烈度为Ⅷ度的地震 1 次; 影响烈度为Ⅶ度和Ⅵ度的地震分别为 2 次和 4 次, 其余地震对市区场址的影响烈度 < VI 度。从以上分析可见, 泉州地区历史上的地震活动水平较高, ≥Ⅶ度的地震影响主要来自滨海断裂带, ≥Ⅵ度的地震影响则主要来自市区周围及滨海断裂带上的地震影响。

以下对表 3 中所列地震, 结合表 1, 进一步分析其对泉州地区产生的地震影响:

1) 1604 年泉州海外 7½级、1607 年泉州湾 5¼级和 1609 年泉州海外 5¾级地震: 1604 年大震发生后, 随后发生了 1607 年和 1609 年两次强余震, 其中: 1604 年这次地震泉州市区及其周边所属的晋江、石狮

¹福建省地震历史资料组(1979)。福建省地震历史资料汇编。

²中国地震局地球物理研究所(1994)。福建省惠安山前核电厂厂址地震详细调查及其安全性评价报告。

Table 1. The records table of historical earthquakes in Quanzhou and its surrounding municipalities, county
表 1. 泉州及周边市、县的历史地震记载简表

序号	时间 (年月日)	记载资料 (括号内为对应地震的说明)
1	963.5	乃大享将史,伏甲于内,将条洪进,酒数行,地忽大震,栋宇将倾,坐立者不自持。(本省最早的破坏性地震记载,泉州 4¾级地震)
2	1067.秋	地震。(广东潮阳、揭阳一带 6¾级地震,震中烈度Ⅸ度)
3	1067.11.10	漳、泉诸州地震。
4	1290.3.21	地震。惠安、安溪亦震。
5	1290.3.23.	地震。
6	1290.3.24.	地震,惠安亦震。(其后 1394.5.3、1394.6.1、1394.8.27、1397.1.7 亦有相同的文字记载)
7	1480.3.16.	地震,有声如雷,屋宇皆摇。
8	1486.10.21	地震。
9	1495.9.26.	地震。福州、兴化、泉州三府同日地震。
10	1500.4.20.	兴化、泉州地震。
11	1500.5.3.	泉州、漳州府地震有声。(其后 1500.12.28 亦有相同的文字记载)
12	1501.2.15	福州、兴化、泉州、漳州四府俱地震。
13	1502.	地震。惠安亦震。
14	1511.11.5	地震,声如雷。
15	1516.9.	地大震。惠安,南安亦震。
16	1517.3-7.	地数震。
17	1517.5.9	地震。
18	1519.10.18	福州、兴化、泉州三府各地震。
19	1520.8.17	福州府、泉州府夜各地震。
20	1538.10.	自辰时至夜半余,墙屋有震倒者。(安海 4¾级地震,震中烈度Ⅵ度)
21	1543.5.9	福州、兴化、泉州、漳州四府地震。
22	1544.2.13	正月至二月地震六次。
23	1544.10.	安海地又震,白毛生。
24	1566.1.21	福州、兴化、泉州三府各地震。
25	1567.3.9	地震。(其后 1567.3.31、1567.5.11 亦有相同的文字记载)
26	1574.8.19	地震,紫帽山裂。(福州、连江之间 5¾级地震,震中烈度Ⅶ度)
27	1594.6.2	地震。惠安亦震。
28	1596.10.	地大震,洛阳桥扶栏多坠于海。(惠安西南 4¾级地震,震中烈度Ⅵ度)
29	1600.9.29	安海连日地震,生毛短者四、五分,实毛随地,以风吹之皆有毛。(南沃海外 7 级地震)
30	1602.8.5	福州、兴化、泉州三府各地震。(其后 1602.8.8 亦有相同的文字记载)
31	1604.4.5	漳州、泉州等处地震有声。
32	1604.12.29	安海大震,声如雷,震动如下急滩之舟,如登颠风之树,人俱覆坠,未敢必其命,从古未有,半年方息。 泉州府大震,自东北向西南,是夜连震十余次,山石海山皆动,郡城尤甚,地裂数处(清源山地裂涌出沙水,气若硫磺),城内外庐舍圯,楼铺雉堞倾圮殆尽,覆舟甚多,东塔顶盖礅石从南圯者有二,从东南隅圯者有八,颓而下诸级,沿所压者皆圯。(泉州海外 7½级地震)
33	1607.2.	地震,门户摇动有声。惠安亦震。

Continued

34	1607.秋	地大震，城垣坊刹胥就颓，洛阳桥大石梁析入于海，桥北故地塌南四尺奇，渊址剥落十仅存三、四，造墩二十二，修旧三十五，整补扶栏五百。地大震，飓风淫雨交作，东岳青帝宫坏，城堞尽圯，洛阳桥倾。清静寺：地大震，暴风淫雨，栋栋飘摇，倾圯日甚。东岳行宫：青帝前殿尽圯，帝像坏。(泉州湾 5¼级地震)
35	1609.6.7	地震，门户屋瓦俱摇簸有声，府学殿堂两庑坏，清静寺楼颓其角。(泉州海外 5¼级地震)
36	1632.2.10	地震。惠安、南安、安溪皆震。(其后 1632.3.22、1671.11.26 亦有相同的文字记载)
37	1673.5.2.	地震，其鸣如雷，惠安、安溪亦震。
38	1686.8.	地震。兴化府、惠安亦震。
39	1691.5.	安海地震，十都地裂百余丈，越日复平。(安海附近 4½~5 级地震，震中烈度VI度)
40	1711.7.	地震。惠安、同安亦震。
41	1711.8.31	又大震。惠安、同安及漳州府各县皆震。
42	1711.10.22	地震。(其后 1713.3.亦有相同的文字记载)
43	1791.4.8	地大震。(漳浦县南海中 5½级地震)
44	1808.8.6	夜地大震，声大。
45	1815.秋	地震。(可能是台湾淡水附近 8 级地震影响)
46	1815.冬	又震。
47	1848.12.3	地震。(台湾漳化地震，震中烈度IX度)
48	1906.3.28	安海地震，毛生。(厦门海外 6¼级地震)
49	1906.4.14	二点半钟地震有声，五点、七点各又地震，福州亦震。(台湾嘉义 6 级地震)
50	1907.10.15	地大震，霎时床榻震动，椽柱屋梁折作声...闻东城角屋宇倾颓，墙垣倒坏。(泉州市东南 5 级地震，震中烈度VI度)
51	1918.2.13	地震，房屋有损坏，市区破旧房屋倾倒数间，东城一牌坊顶坠，城墙坠石。(广东南澳 7.3 级地震，影响烈度VII度)
52	1935.	地震，房屋稍有摇摆。
53	1941.2.	地震。
54	1994.9.16	强烈有感，有眩晕和惊慌感，有门窗摇晃作响。(台湾海峡南部 7.3 级地震，影响烈度V度)
55	1995.2.25	闷雷似地声，上、下颠簸和前后摇晃，门窗作响。(晋江海外 5.3 级地震，影响烈度V度)
56	1999.8.5	强烈有感，惊慌外逃，有地声及门窗响声。(惠安海外 ML 4.8 级地震，影响烈度IV度)

Table 2. The destructive earthquake effect on the intensity of urban area of Quanzhou calculated by the seismic intensity attenuation relationship

表 2. 由地震烈度衰减关系计算得到的破坏性地震对泉州市区的影响烈度

序号	发震时间 年 月 日	震中位置(°)		参考地名	震级	震中 烈度	距离 (km)	影响烈度	
		北纬	东经					计算值	归整值
1	963.05	24.9	118.6	福建泉州	4¾	VI	0	6.0	VI
2	1185.06.15	24.6	117.6	福建漳州	6½	VIII	106.3	5.6	VI
3	1445.12.21	24.5	117.6	福建漳州	6¼	VIII	110.3	5.2	V
5	1596.10	25.0	118.7	福建惠安西南	4¾	VI	15.0	4.8	V
6	1607.秋	24.9	118.7	福建泉州湾	5¼		10.1	5.9	VI
7	1609.06.07	24.8	119.0	福建泉州海外	5¾		41.8	5.5	VI
8	1691.05	24.6	118.5	福建晋江安海	4¾	VI	34.8	4.1	IV
9	1907.10.15	24.8	118.7	福建泉州	5	VI	15.0	5.2	V
10	1934.05.21	25.0	118.2	福建安溪	5¾	VII	41.8	5.4	V

Table 3. The destructive earthquake influence on the intensity of Quanzhou urban area ($\geq VI$ degree)
表 3. 破坏性地震对泉州市区的影响烈度($\geq VI$ 度)

序号	发震时间	震中位置(°)		参考地名	震级	震中烈度	距离(km)	影响烈度
	年 月 日	北纬	东经					
1	963.05	24.9	118.6	福建泉州	4 $\frac{3}{4}$	VI	0	VI
2	1185.06.15	24.6	117.6	福建漳州	6 $\frac{1}{2}$	VIII	106.3	VI
3	1604.12.29	24.6	119.1	泉州海外	7 $\frac{1}{2}$	VIII	60.5	VIII
4	1607.秋	24.9	118.7	泉州湾	5 $\frac{1}{4}$	VI	10.1	VI
5	1609.06.07	24.8	119.0	泉州海外	5 $\frac{3}{4}$	VI	41.8	VI
6	1906.03.28	24.3	118.6	厦门海外	6 $\frac{1}{4}$	VII	66.7	VII
7	1918.02.13	23.2	117.4	广东南澳	7.3	X	224.7	VII

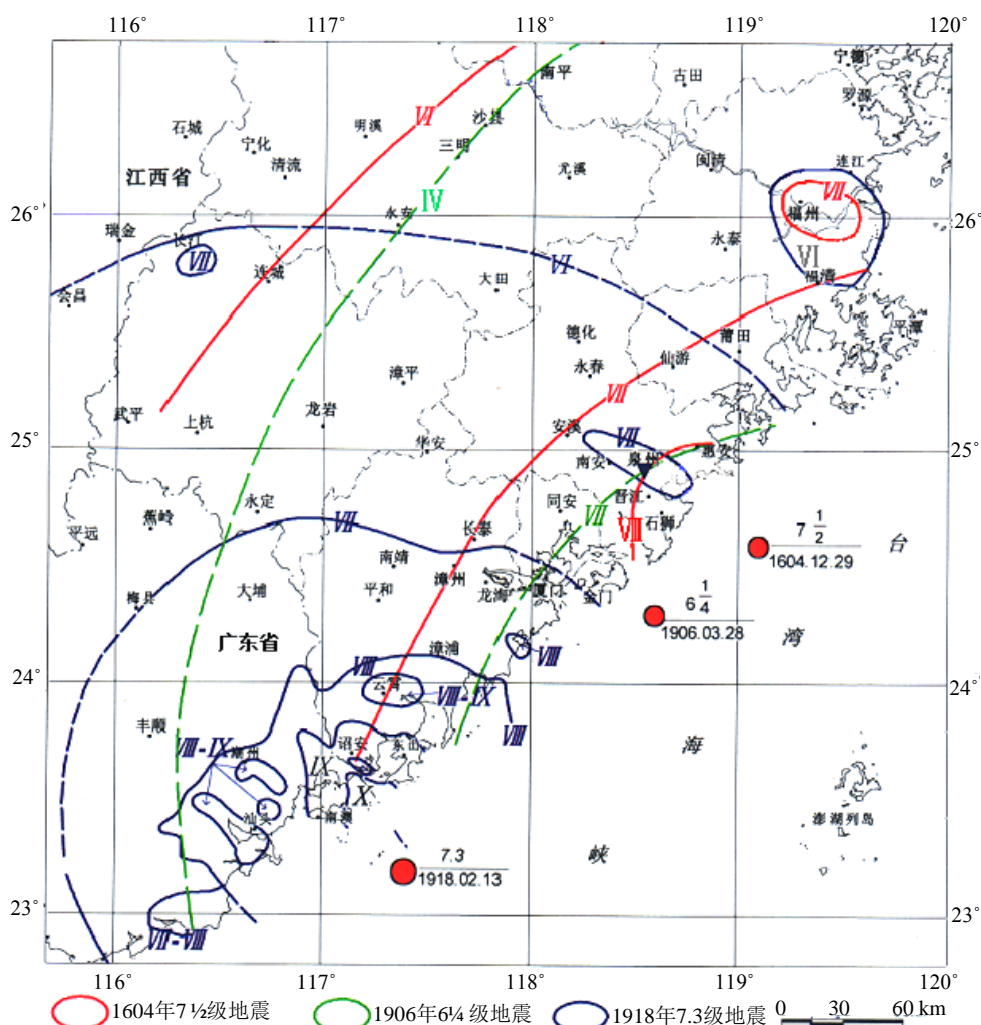


Figure 3. Isoseismal map of earthquake intensity on influence of historical earthquake (The Quanzhou earthquake (in the sea) with M 7 $\frac{1}{2}$ on December 29, 1604 in Fujian province²; The Xiamen earthquake (in the sea) with M 6 $\frac{1}{4}$ on March 28, 1906 in Fujian province [4]; The Nanao earthquake with M 7.3 on February 13, 1918 in Guangdong province [5])

图 3. 历史地震影响烈度等震线图(1604 年 12 月 29 日福建泉州海外 7 $\frac{1}{2}$ 级地震²; 1906 年 3 月 28 日福建厦门海外 6 $\frac{1}{4}$ 级地震[4]; 1918 年 2 月 13 日广东南澳 7.3 级地震[5])

及惠安由于距离近,是受影响最大的重灾区,受影响的地震烈度是陆域上最高的Ⅷ度。表1中历史记载所列的震害描述,说明了当时所遭受的破坏情况,鉴于该地震对华南沿海的地震活动性分析、地震危险性分析及城市基本烈度和建筑抗震设防标准的确定起着主要贡献作用,但这次大震,由于当时无仪器记录地震参数只能靠史料记载,又由于这次大震的震中在海域难以圈定出极震区的位置,因此,不同专家学者对地震发生的地点和震级有不同的认识。其中1983年出版的《中国地震目录》[13]该地震的震中位置定在 25.0°N 、 119.5°E ,相应震级为8级;1994年中国地震局地球物理研究所等单位在完成的惠安核电站厂址地震安全性评价报告(见第4.2节注2)及之后这次大震的震中位置定在 24.6°N 、 119.1°E ,相应震级修订为7½级。虽震级减少了,但震中距泉州市中心的距离亦由原约90公里减至60公里。1604年的这次大震由于波及十几个省的部分地区,影响最远的记录可达1000多公里,结合表1中建筑物的破坏特征分析,该大震可能是一个具有一定震源深度的地震。然而1607年和1609年的两个余震,虽震级远小于主震,但表1中泉州地区遭受破坏的古建筑(洛阳桥、清净寺、东岳行宫、泉州知府衙门的大门和泉州府学等)其记载并不少于主震,部分建筑物的破坏甚至比主震还严重,若比较3个地震对泉州市产生的地震影响可看出潜在下列可能的因素:①余震离泉州地区较近;②余震的震源深度较浅;③建筑物的震害是主余震双重影响的叠加结果[14]。通过对表1中历史资料的核查可看出该大震对泉州地区的破坏影响更多的是反映在场地震害方面,如清源山地裂,地缝中涌出砂、水,气若硫磺;洛阳桥多处出现地裂缝;安溪山川崩裂等,而两个余震对泉州地区的破坏影响则主要反映在建筑结构遭到破坏方面。从表1中及其他各地的历史地震记载还可看出,这次大震及其余震有许多关于建筑物破坏的记载,但却无人员伤亡的记录,实属罕见,从有关历史记载亦可看出这次大震具有明显的方向性(自东北向西南),对房屋造成的破坏形式和使人产生的感觉,显然左右摇晃(横波)引起的比上下颠簸(纵波)以及扭动(面波)引起的记载要多,因此估计这次大震对市区建筑结构的破坏大多是由横波引起的。一些存在液化和软土地基的古建筑场址(如泉州清净寺和天后宫),在这次大震中未出现砂土液化和软土震陷等地基失效现象,这是与按我国目前建筑抗震设计规范(GB5011-2010)[15]进行评判得到的不同结果[14]。

2) 1906年3月28日厦门海外6¼级地震:据史料记载,该地震泉州破坏最重,其民房倒坏,清源书院假山后之石坊崩倒,东门外赐恩岩上的魁字石滚落平地。这次地震震后隔日发生了3月29日厦门海外5½级强余震,并在震后5个月的8月19日在厦门近海再次发生5¼级强余震,由于余震频繁,地震序列持续了较长的时间。这次主震对泉州市区的影响烈度已达到泉州市区的设防烈度Ⅶ度水平,同时由于震中位置靠近福建经济发达和人口密集的厦门、泉州地区,因此深入探讨该区域地震的活动规律及其影响,对闽南地区的经济发展具有重要的意义。

3) 1918年2月13日广东南澳7.3级地震:极震区震中烈度Ⅹ度,长轴为北西向,Ⅷ度和Ⅶ度区长轴为北东向,泉州地区的影响烈度为Ⅶ度,属于Ⅵ度区内的高烈度(Ⅶ度)异常区,该异常区长轴为北西向,基本沿永安-晋江断裂带的安溪至泉州段的晋江沿岸分布,这次地震市区房屋有损坏,旧房屋倾倒数千,东城一牌坊顶坠落,城墙坠石。这次地震震中距约225公里,影响烈度却高达泉州市区的设防烈度Ⅶ度水平,分析其原因:地震波振幅的周期随震中距的增加,高频成分减少,低频成份增加或发育,其地震动的卓越周期具有向低频方向移动的特点,而晋江沿岸软弱场地土居多,使地震动的幅值得以放大,同时一些为木结构的早期老式民房结构自震周期较大易产生共振、一些具有一定高度的牌坊顶部约束条件较差,易于脱落,上述可能是导致泉州地区成为这次地震高烈度异常区的原因。

4) 963年5月泉州4¾级地震:1995年版《中国历史强震目录》[4]曾将其删除。根据表1中该地震的史料记载,袁定强和陈光桐1998年[7]在对福建省历史强震目录的复核与评述时指出:“考虑到闽南古建筑的传统结构,这种军政要员宴请大厅在结构上应属于穿斗木结构,抗震性能较好。从当时记载的宏

观现象看,显然地震烈度不低于Ⅵ度。但是仅为单点记载,烈度从低估计为Ⅵ度,震级为4¾级。这是福建省有记录以来的最早一次破坏性地震,应加使用为宜”。因此,963年5月泉州4¾级地震引用《福建省若干历史地震复核结果》(中国地震局,中震防函[2005]44号文)和《福建省历史强震简目(公元963年-2005年)》(福建省地震局,闽震[2006]22号文)中确定的地震参数,其地震三要素(时间、空间和强度)见表1,表3。

5) 1185年6月漳州6½地震:在漳州,居民屋、舍多摧陷,有被压致死者,震中烈度达Ⅷ度。有感范围据记载北至南昌、杭州,南至广州,其长轴呈北东向[16]。该地震在泉州及周边县城查无历史记载,但据推算和表2的计算该地震对泉州市区的影响烈度应有Ⅵ度。

4.4.2. 近年来对市区场址产生明显震感的闽台地震

近年来一些对泉州地区产生明显震感的地震分别为:

1) 2007年8月29日永春4.7级地震:此次地震发生在北北东-北东向的政和海带断裂带与北西向的晋江-永安断裂交汇处,震源深度为15.3公里,震中区附近震感尤为强烈,极震区烈度为Ⅴ度,泉州地区普遍有感,此次地震未见人员伤亡和房屋倒塌。距震中约110公里安装在Ⅱ类场地上的泉州鲤城强震观测台获取的加速度记录的最大峰值水平向和垂直向分别为 5.38 cm/s^2 和 1.73 cm/s^2 ,相当于影响烈度为Ⅲ度。

2) 2013年9月4日莆田仙游4.8级地震:属于震群型地震,当年8月23日到10月30日,连续发生4.0级、4.8级和4.3级3次地震,其中最大为4.8级,震中位置 25.6°N 、 118.8°E 、震源深度10 km,距泉州市区的距离约80公里。泉州震感明显,不少市民在睡梦中被震醒,震动时间持续数秒,窗户玻璃晃动,引起社会关注,但没有发生房屋开裂和人员受伤情况。据福建省地震局公布的地震台网仪器烈度报告表显示,震中区仙游的仪器烈度为5度,震感最为强烈;泉州市市区仪器烈度为2度,有比较明显震感。仪器烈度是根据基岩处测震台站记录经过仿真技术换算得到的峰值加速度进行估算。近年发生在福建仙游震群的地震活动呈现活跃态势,地震频次和强度有所增强。仙游震群发生在北西向沙县-南日岛断裂带上,地震活动空间与该断裂带走向基本一致,据此认为属于构造地震。如从岩土动力学理论亦可认为:2010年5月震中附近通过下闸蓄水验收的金钟水库库区由于长时间的蓄水,使得其附近断层的孔隙水压力升高,水介质对断层面产生的润滑作用,可能易导致断层的剪力强度降低而发生错动,其所释放出来的能量,部分引发了地震。因此可根据断层长度、余震分布和水库库容分别研究其可能潜在的震级上限和对周边城乡可能产生的影响。

3) 近年台湾海峡及台湾地区对泉州市区产生震感明显的地震:如:1994年9月16日台湾海峡的7.2级(震中距264公里)、1999年9月21日台湾南投7.4级(震中距241公里)、2001年12月18日和2002年03月31日台湾花莲以东海域的7.5级(震中距453公里)级与7.4级(震中距374公里)、2006年12月26日台湾恒春海域7.4级(震中距394公里)、2010年3月4日台湾高雄6.7级(震中距300公里)等地震对泉州市区的影响烈度均 \leq Ⅴ度,地震时区内多数人或部分人感觉到震感强烈,门、窗摇晃作响,室内悬挂物明显摆动,但民房一般无损,受伤人员多为避震时,慌张逃离跌伤所致。

5. 结论

通过分析闽台地区的地震构造与地震活动性及历史地震对泉州地区的影响可得如下认识:

1) 对泉州地区地震影响较大的断裂构造主要有:活动时代属第四纪全新世的北北东-北东向滨海断裂带的泉州海外段、金门海外段、南澳海外段,晚更新世仍有活动的北北东-北东向长乐-诏安断裂带和北西向的闽江断裂带东南段、永安-晋江断裂带东南段和九龙江断裂带西北段,其中北北东-北东向断裂规模较大,尤其是滨海断裂带是区域内的强震发震构造。历史上对泉州地区地震影响较大的7级以

上大震均发生在滨海断裂带上。泉州地区位于北北东-北东向长乐-诏安断裂带中段和北西向永安-晋江断裂带东南段的交汇地段,近期中小震活动活跃且构造上存在发生6级左右中强地震的背景条件。

2) 福建及其邻近沿海地区最早记载的破坏性地震为963年泉州4 $\frac{1}{4}$ 级地震,最大的历史地震为1604年泉州海外7 $\frac{1}{2}$ 级地震;区域内地震活动分布总体特征为东强西弱,南强北弱,南部地区远比北部地区地震活动活跃;对泉州地区地震影响较大的东南沿海一带地震震源深度主要分布在20 km范围内,属地壳内的浅源构造地震;泉州地区位于华南地震区的华南沿海地震带北段内,其地震危险性主要来源于华南沿海地震带的地震活动影响。华南沿海地震带未来百年内年仍处于第二活跃期的后期调整阶段。

3) 台湾地区自1644年以后开始有地震记载,区内破坏性地震震中分布密集、强度大、频度高,最大的历史地震分别为1920年和1972年发生在台湾东海岸近海海底的两次8级特大地震。台湾地区西部地震带的地震活动性比东部低,地震的频度与强度均比东部小;但台湾西部地震带震源深度浅(约10余公里);东部地震带震源较西部地震带深,台湾地区震源深度较深的地震大部分发生在台湾东北部海域;台湾东部地震带可划分为五个活动期,目前仍处于第五个活动期内。台湾西部地震带可划分为两个活跃期,目前仍处于后一活跃期内。

4) 泉州地区地震历史资料丰富,已有一千多年的历史地震记载史,记录较为完整。通过对历史地震的史料记载、等震线图的分析及衰减关系的计算结果,得到历史上对市区场址影响烈度达Ⅵ度及以上的地震共7次,其中影响烈度为Ⅷ度的是1604年泉州海外7 $\frac{1}{2}$ 级地震;影响烈度为Ⅶ度的地震共有2次,分别为1906年厦门海外6 $\frac{1}{4}$ 级地震和1918年广东南澳7.3级地震;影响烈度为Ⅵ度的地震共有4次,分别为963年泉州4 $\frac{3}{4}$ 级地震、1185年漳州6 $\frac{1}{2}$ 级地震、1607年泉州湾5 $\frac{1}{4}$ 级地震和1609年泉州海外5 $\frac{3}{4}$ 级地震;其余地震对市区场址的影响烈度 \leq Ⅴ度。有关分析表明,泉州地区历史上的地震活动水平较高, \geq Ⅶ度的地震影响主要来自华南沿海地震带的滨海断裂带, \geq Ⅵ度的地震影响则主要来自市区周围及滨海断裂带上的地震影响。台湾东、西部地震带由于距离较远,影响较弱;对福建沿海能产生较明显震感的地震,其在泉州市区的影响烈度均 \leq Ⅴ度。

致 谢

本文得到泉州市科技计划重点项目(2012Z136)的资助。

参考文献 (References)

- [1] 何春荪. 台湾地质概论[M]. 台北: 经济部中央地质调查所, 1994.
- [2] 陈园田, 谢志平. 台湾海峡的活动断裂与地震活动性[J]. 华南地震, 1996(1): 57-62.
- [3] 胡聿贤, 主编. GB18306-2001《中国地震动参数区划图》宣贯教材[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [4] 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.
- [5] 国家地震局震害防御司. 中国近代地震目录(公元1912年-1990年)[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1999.
- [6] 中国地震台网. 中国地震台网(CSN)地震目录[EB/OL]. <http://www.csndmc.ac.cn/newweb/data.htm#>, 2015.
- [7] 袁定强, 陈光桐. 福建省历史强震目录的复核与评述[J]. 中国地震, 1998(3): 6-14.
- [8] 福建省地方志编撰委员会. 福建省地震志[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2001.
- [9] 林松建, 陈为伟, 郑师春, 等. 福建地区地震震源深度特征的统计分析[J]. 地震, 2010(1): 82-89.
- [10] 廖其林, 王振明, 王屏路, 等. 福州-泉州-汕头地区地壳结构的爆炸地震研究[J]. 地球物理学报, 1998(3): 270-280.
- [11] 林建生, 陈俊峰, 林子健, 等. 场地地震安全性评价中确定设计地震动参数方面若干问题的研究[J]. 世界地震工程, 2006(4): 150-159.
- [12] 汪素云, 俞言祥, 高阿甲, 等. 中国分区地震动衰减关系的研究[J]. 中国地震, 2000(2): 99-106.

- [13] 顾功叙. 中国地震目录[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1983.
- [14] 林建生, 林子健, 陈俊峰. 历史大震与泉州古建筑塔寺桥类的结构抗震[J]. 世界地震工程, 2005(2): 159-166.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部等. 建筑抗震设计规范(GB5011-2010) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [16] 魏柏林, 冯绚敏, 陈定国,等. 东南沿海地震活动特征[M]. 北京: 地震出版社, 2001.