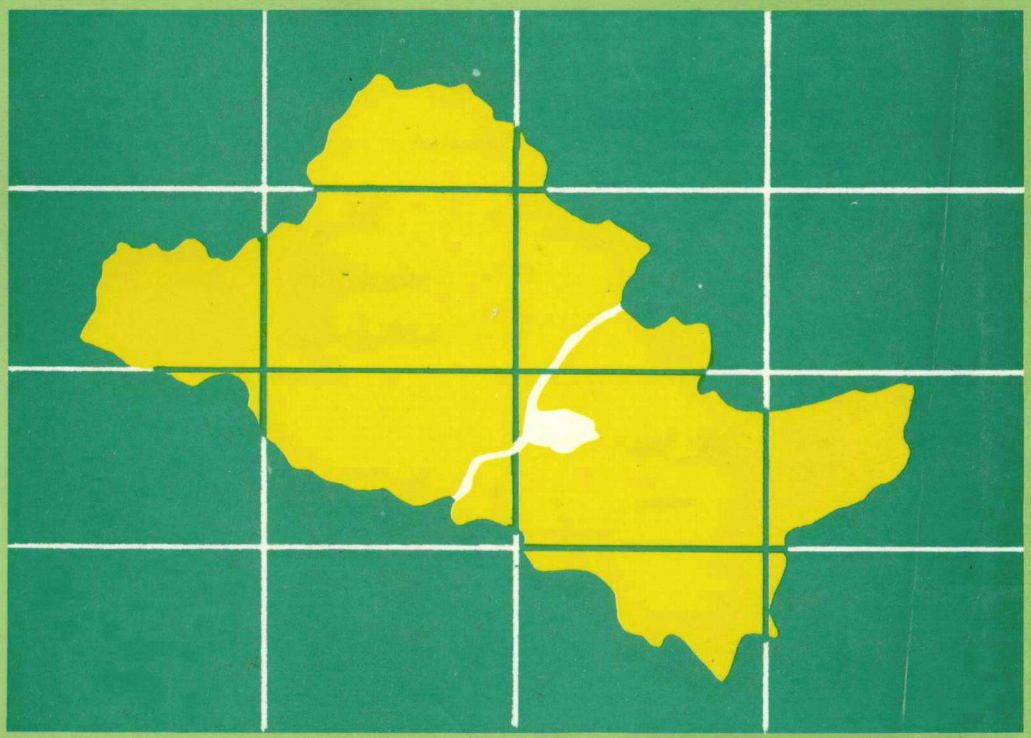
山西临汾地震研究与系统减灾

马宗晋　主编



地震出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

山西省人民政府
国家地震局 重大研究项目

山西临汾地震研究与系统减灾

马宗晋 主编

地震出版社

1993

(京) 新登字 095 号

内 容 提 要

减轻自然灾害是一个与人民生命财产安全息息相关的科学难题。本书是山西省人民政府和国家地震局联合基金会资助的、志在预测、预防山西临汾地区地震灾害的“山西临汾地震区划与系统减灾”典范项目的主要成果之一。含有有关地震成因、地壳结构、物质状态、地震活动性、城市防震、抗震救灾等方面的论文 68 篇，在对本区地震成因、地壳结构、物质状态及地震活动性研究的基础上，对本区进行了地震烈度小区划、工程稳定性分析和与地震伴生的自然灾害的预测，为该区制定相应的城市发展、城市生命线工程建设规划和设计方案提供了科学的依据。

本书可供从事减灾、防灾、工程地震、工程地质、工程建筑、地震地质等学科的科技人员及管理人员参考。

山西临汾地震研究与系统减灾
马宗晋 主编

地震出版社出版
北京民族学院南路 9 号
人民教育出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
全国各地新华书店经售

787×1092 1/16 38.5 印张 959 千字
1993 年 8 月第一版 1993 年 8 月第一次印刷
印数 0001—1000
ISBN 7-5028-0855-8/P·533
(1248) 定价：40.00 元

项目工作委员会：吴俊洲　方樟顺　孙国学　郭雅儒
谢敏生　刘建基　王国治　杨广才
专家顾问组：丁国瑜　胡聿贤　梅世蓉　时振梁
科学技术组：马宗晋　邓起东　刘光勋　尹之潜　孙国学
编务领导小组：王国治　孙国学　吴宁远　杨广才
主　　编：马宗晋
副　主　编：邓起东　刘光勋　尹之潜　马宝林
编委会：(以姓氏笔画为序)
马宗晋　马宝林　尹之潜　邓起东　刘光勋　刘国栋
许民治　陈建英　苗良田　周克森　赵新平　徐德诗
高振寰　蒋　溥

前　言

山西临汾地区 1303 年发生了 8.0 级地震，392a 之后又发生了 1695 年的$7\frac{1}{2}$级(以前为 8.0 级)地震，两次地震震中相距仅 45km，两次地震极震区重叠 65%，通常认为属原地重复的两次强烈地震。在华北 2000 多年的历史地震记载中，时间间隔在不到 400a 内、$M\geqslant$ 7.5 级地震在 45km 的震中距离内重复两次的事件仅在临汾出现过，所以临汾的两次强烈地震是一个特例。但山西地震带整体表现出规律性很强的 300a 周期韵律，人们不能不担心临汾地区正好是强烈地震周期性复发的特殊点，而且正处于 1695 年之后又一次时隔 300a 大震可能复发的威胁之下。因此，山西省人民政府和国家地震局十分关切对这一地震问题的回答，为此组织了国家地震局所属的研究所和省地震局的科研人员立项研究，要求尽可能充分地揭示临汾强震复发的特定条件，以推测未来的趋势。

地震的发生是由其内部依据和外部条件决定的。一般而言，地震过程是不可逆的，一定历史阶段内地震的重复发生不是对原过程的重复，而是依据变化着地球内部孕震因素叠加着规律性变动的诱发因素所发生的相似事件。严格地说，地震的大周期是不重复的，都是渐进式的演化；而小周期则表现出某些相似性。我们的任务是确定相似的地震小周期在原地重现的规律及其在大周期中的相对位置，以及大地震序列在小、大周期中的分布。与此同时我们还要解决地震小周期重现时的对策。

面对这一地震科学研究的难题，为保护山西临汾地区的人民生命财产安全，要求我们在进行地震区划、小区划、工程稳定性分析之前必须从基础研究入手，加深对基底构造、震源区物质构成和状态、地震活动性、区域和近场区地震构造以及地球物理场的测量和深部构造的多手段探测与实验，以深化对两次特大地震发生的特定条件和地震成因机制的认识，从更大范围内的历史地震学的研究，以探索特大地震和中强地震的重复周期，解决两次特大地震与中-强地震序列之间的关系。

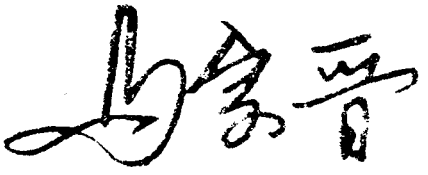
针对今后 50a 内中强地震重复周期和与两次特大地震序列之间的相关关系，以及潜在地震危险区的多重判别结果，进行地震烈度小区划、工程稳定性分析和与地震伴生的次生灾害的预测，为该区制定相应的城市发展、城市生命线工程建设规划和设防方案，提供地震科学依据；与此同时对今后 50a 内可能发生的中强地震提供一套实用性强、可操作的城市救灾预案。

减轻地震灾害是一个与人民生命财产安全息息相关的科学难题，需要人类为之不懈地努力，将其推向地震可知可报，其灾害和伴生灾害可防可救的自觉阶段，在此过程中对问题的认识和解决问题的方法和途径，不可避免地会有不少探索中的争议，所以，本文集本着百花齐放，推陈出新的民主科学方针，将此项工作中针对地震成因、地壳结构、物质状态、地震活动性、城市防震、抗震救灾等方面 68 篇有代表性的学术论文原原本本地奉献给读者。毋庸置疑，这些文章既代表科学方面新发现、新创造和新动向，又难免会有某些不足和疏漏，因此，敬请广大读者指正。

山西省人民政府、国家地震局地震联合基金会支持了该项目在研究期间必要的经费；

需要全本请访问 www.ertongbook.com

执行期间中国国家自然科学基金会也对与此相关的基础理论研究课题给予了经费支持。在整个执行期间，山西省政府领导和国家地震局领导曾亲自参与该项目的研究大纲审定和执行进度的检查，促进了项目的顺利开展。广大科学工作者在历时三年时间，努力工作，用智慧和勤奋攻克了许多科学上的难关，得以使该项目如期圆满完成，在此一并致以感谢。



1993.6

目　录

总　论

山西临汾地区的地震研究和震灾预评估与预防 …… 马宗晋等（1）

第一部分

山西及其邻区强震构造条件和潜在震源区划分 …… 刘光勋等（12）
山西及邻区新构造运动分区及其特征概述 …… 张世民　刘光勋（23）
山西断陷带主要活动断裂特征 …… 孟宪梁等（31）
山西地区区域地壳形变场和现代构造活动 …… 朱德瑜　刘光勋（40）
山西地堑系垂直形变及其时空演化成因探讨 …… 张崇立等（50）
山西断陷带及周缘构造应力场分析 …… 谢富仁等（59）
临汾盆地地震构造基本特征和潜在震源区的划分 …… 邓起东等（67）
山西临汾盆地的新构造单元与地震活动 …… 苏宗正等（96）
山西临汾盆地的断陷沉降 …… 苏宗正等（102）
临汾盆地晚第四纪沉积与最新构造运动 …… 邓起东等（111）
临汾盆地近代地壳运动的考古学研究 …… 王汝雕（130）
霍山山前断裂晚第四纪活动和古地震研究 …… 徐锡伟等（136）
1303 年洪洞地震的地震构造 …… 徐锡伟　邓起东（149）
罗云山山前断裂第四纪活动特征 …… 王挺梅等（159）
1695 年临汾 $7\frac{1}{2}$ 级地震的地震构造研究 …… 王挺梅等（172）
临汾盆地大阳断裂带和浮山断裂第四纪活动特征 …… 徐锡伟等（190）
临汾盆地主要隐伏活动断裂浅层地震勘探 …… 于之水等（198）
临汾盆地两个历史大震震源过程的数值模拟研究 …… 宋惠珍等（203）
利用重力资料研究临汾及其周围地区地壳上地幔结构特征 …… 刘占坡等（215）
临汾盆地及其邻近地区航磁资料处理与深部构造 …… 余钦范等（224）
山西高原及临汾盆地地壳上地幔速度结构 …… 刘昌铨　嘉世旭（231）
汾渭断陷带均衡异常的研究 …… 殷秀华等（236）
临汾盆地 CT 成像及微震活动的三维定位 …… 田　勇　吴建春（244）
山西洪洞 8 级大震区霍山深部断裂的地震转换波测深研究 …… 邵学忠等（251）
山西临汾盆地及外围地区大地电磁与地壳构造活动研究 …… 孙　洁等（261）
山西断陷带中南段地热研究 …… 吴乾蕃等（275）
临汾地区岩石物性研究 …… 张友南等（283）
临汾盆地小震应力降及介质 Q 值的研究 …… 赵新平等（295）
关于山西地震历史资料的研究与认识 …… 齐书勤（302）

山西地区强震潜在危险区图象识别及特征分析 …… 郭跃宏等 (307)
1815 年以来山西地震带的地震活动 …… 啜永清 (315)
山西地震动衰减关系研究 …… 温春生等 (319)
山西地震带区域现代地壳应力场 …… 刘 巍 (326)
山西地震带历史地震序列的统计分析和极大熵谱分析 …… 彭美煊 (334)
山西地震带强震活动特征分析 …… 张国民 (343)
山西临汾邻近地区 7 级潜在震源区的图象识别及强震早期震兆分析 …… 黄德瑜 (349)
临汾盆地近期小地震的重新定位 …… 傅征祥等 (357)
华北地震区强震活动不均匀性分析 …… 傅征祥 (361)
华北地震区地震活动性分析和山西临汾地区地震危险性估计 …… 刘浦雄 (368)
华北强震序列第三和第四活跃期内加速特征的实验研究 …… 卢振业等 (379)
山西裂谷带南段地壳岩相结构和壳内异常层 …… 马宝林 (387)
临汾地区地壳结构和强震成因 …… 张家声 (397)
临汾盆地内两次特大地震的闭锁结构和解锁过程的模式研究 …… 武 烈 (406)
临汾地区主要地壳岩石的力学性状与地震危险区的岩石学背景 …… 张 流等 (420)
临汾地区主要地壳岩石的变形特性及潜在孕震层 …… 李 彪等 (430)
复杂结构岩体变形过程中粘滑事件的间隔与周期 …… 张 流等 (438)
壳内高压流体对临汾地区地震影响的实验研究 …… 何昌荣等 (445)
临汾地区壳内岩石的蠕动强度 …… 何昌荣等 (450)
地震失稳的滑动-弱化模式与大地震复发间隔估计 …… 牛志仁 (454)
临汾两次 8 级地震重复发生的动力学特征研究 …… 苏 刚 (461)
渭河盆地东部强震对临汾地区的影响 …… 卞菊梅等 (474)

第二部分

临汾市场地地质地貌单元及其工程地震环境特征 …… 钱瑞华等 (488)
临汾市场地地震反应分析和场地区划 …… 梁小华 蒋 溥 (496)
临汾场地条件对近场强地面运动影响的数值模拟 …… 高维安等 (503)
活断层地表断错工程评价及防灾对策 …… 钱瑞华等 (511)
临汾市场地区划图系和综合区划图 …… 蒋 溥 梁小华 (517)
临汾市房屋建筑震害及经济损失人员伤亡预测 …… 尹之潜等 (524)
临汾市重要建筑震害预测 …… 李树桢 朱玉莲 (532)
临汾市生命线系统震害预测 …… 陆 鸣等 (538)
山西临汾地区特殊结构震害预测 …… 翟 桐 熊建国 (550)
临汾市场地震害预测 …… 高振襄 王立功 (559)
临汾市震害地质环境及临汾盆地在历史地震中的场地破坏 …… 高振襄 王立功 (570)
地震活动性参数的确定 …… 彭美煊 (576)

第三部分

临汾市地震次生灾害危险评估与防御对策 …… 陈建英等 (579)

临汾市减轻地震灾害对策 …… 陈建英等 (587)
浅析震时城市功能保障 …… 李正枝 (596)
临汾市防震减灾工程对策 …… 王立功 (598)

·总　论·

山西临汾地区的地震研究和震灾预评估与预防

马宗晋[①]　邓起东[①]　刘光勋[②]　赵新平[③]
刘国栋[①]　马宝林[①]　周克森[④]　蒋　溥[①]
尹之潜[⑤]　高振寰[①]　陈建英[①]　苗良田[⑥]

一、引　言

临汾是历史强震的多发区，1303 年和 1695 年两次特大地震的间隔仅 392a，现已临近特大地震周期的倍数点，所以地震趋势评估的研究十分迫切。为了彻底解决这个特大地震威胁区的防灾与减灾问题，需要把从地震趋势预报、震灾评估直到预防措施的研究工作组成一个复杂的系统工程，它涉及到诸如地震成因环境、历史地震序列分析、烈度区划与烈度小区划、地基结构和建筑物结构稳定性、工农业等基础设施布局和城乡人口规模等多方面的自然和社会境况。为此国家地震局和山西省政府联合立项，调集各有关学科和研究团体协同工作，期望揭开临汾“大震周期”之迷，并为近 50a 乃至百年内可能发生的地震进行震灾评估和预防设计（图 1）。

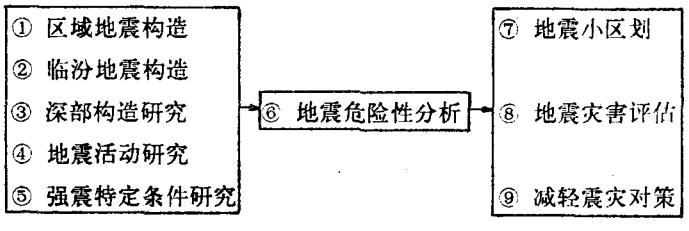


图 1　临汾地区地震区划与防震减灾规划技术路径及工程流程图

二、区域地质构造和应力场

山西断陷带呈北北东向展布于鄂尔多斯块体的东侧，是发生在山西块体内部的新生代断陷带；是山西块体中基底左韧性剪切带和中生代地壳构造变动体的反向再活动的产物。一系列活动断层带，同时也决定着地震集中分布的地带。山西断陷带主要由新生代盆地和

① 国家地震局地质研究所；
② 国家地震局地壳应力研究所；
③ 山西省地震局；
④ 广东省地震局；
⑤ 国家地震局哈尔滨工程力学所；
⑥ 国家地震局地震学校。

盆地间的凸起组成，总体呈北北东向排列，断陷盆地的走向分别为北东东和北北东或近南北向，两种方向的盆地相间排列。北北东向盆地的边界断裂延续性和贯通性较北东东向好，如临汾盆地的东边界一直可延续到洪洞以南。盆地横剖面具箕状特征，盆地内部常有次级横向断裂构造，差异升降运动造成一系列局部凸起和局部凹陷。

根据活动断层滑动矢量的研究和利用1983—1990年的小震记录资料作出的临汾盆地小震综合面解以及全地震带内中强地震的单个震源机制解可知，山西断陷带的应力状态是：北西—南东或北北西—南南东向拉张，张应力轴近水平，倾角变化在20°之内，压应力轴一般变化在30—40°之间。

三、盆 地 构 造

临汾盆地是自上新世以来在山西断陷盆地带中段发育的一个结构复杂的盆地，分布有北北东、北西和近东西三个方向的断裂，其活动时代和活动强度在不同方向断裂上表现不一；盆地内可划分出不同的次级凹陷和凸起，其演化历史和活动特征也均不相同。

临汾盆地由临汾凹陷、洪洞凹陷、侯马凹陷、辛置凸起、浮山凸起、和襄汾凸起6个新构造单元组成。临汾凹陷和洪洞凹陷是盆地的主体构造单元，晚新生代形成以来断陷沉降幅度最大，第四纪以来断陷沉降有逐渐增强的趋势。临汾和洪洞凹陷内的4个深50m钻孔的岩性和孢粉分析结果表明，晚第四纪以来临汾盆地处于温带气候为主的气候条件下。孢粉植物以喜温、较干旱的松等针叶植物和菊科、藜科、禾本科草本植物为主。晚第四纪时期，临汾盆地的沉积环境为河流的河床相、河漫滩相和泛滥平原相、山前洪积相等，基本上没有沼泽相和湖相堆积。临汾盆地晚第四纪河流相堆积是一种构造相堆积，是地壳长期缓慢下沉的结果。以其沉积厚度表征的临汾盆地晚更新世晚期（Q_3^3）断陷沉降幅度和沉降速率分别是11.5—16.2m（平均为14.1m）和0.6—0.85mm／a（平均为0.74mm／a），全新世断陷沉降幅度和速率为19.1—21.5m（平均20.45m）和1.74—1.95mm／a（平均为1.86mm／a）。进入全新世，尤其是最近2500a的晚全新世以来，临汾盆地断陷沉降明显增强，这是临汾盆地强震发生的最新构造背景条件。

四、活动断裂与古地震

两种走向的盆地的边界断裂活动性质存在差异，北东东向盆地边界断裂以正断运动为主，北北东向或近南北向断层则正断兼右旋走滑。盆地边缘断层实际上都是成组断裂在剖面上形成阶梯状断层组合，错断幅度不同，且每一条断裂的不同段落也存在差别，自上新世以来平均垂直位移幅度达1000—2000m，最大可达4000m，平均垂直运动速率为1.0mm／a。

临汾盆地西缘的罗云山山前断裂带是一条复杂的断裂构造带。第四纪以来主要活动时间可分为三期，即中更新世末到晚更新世初、晚更新世初、晚更新世以来。第一期断裂活动最为强烈，断裂活动在空间上是不均一的，横向上，断裂带活动控制临汾盆地西缘第四系的发育；纵向上它被四条北西向断层分割成五段，各段断裂在结构形式、地层组成、地貌特征、沉积厚度和沉积速率等方面都存在差异，反映出断裂活动的不同。其中土门—峪

需要全本请访问 www.ertongbook.com

里段活动尤其强烈，但活动方式基本一致，继承上新世以来垂直差异运动，属右旋正走滑性质。据土门—峪里段晚全新世以来表现的地裂缝特征分析，断裂带活动可能以缓慢蠕滑为主。

霍山山前断裂是临汾盆地北半部的主边界断裂，它由更次一级的剪切断层呈右行右阶或左阶排列而成，上新世以来积累的总的右旋位移量达 9.83km，全新世时期右旋滑动速率的下限值约 5mm／a；5000a 以来，该断层共发生 3 次古地震事件，时间间隔分别是 2000a 和 500a。最后一次地震发生在 1303 年，该次 8 级地震时霍山山前断裂地面表破裂长约 45km，右旋位错最大距离达 8.6m。

北西西向断裂是 1695 年临汾7$\frac{1}{2}$地震的发震构造，这个构造可能是深达 20km 左右的中地壳的不连续构造带。从地表破裂不足 20km、垂直断距不到 0.1m 以及 13 世纪在其两端发生过两次6$\frac{1}{2}$级地震分析，临汾–浮山北西西向发震断层很可能是一条新老结合的活动断层，临汾地震的发生使其连接贯通，地震是在北东东向主压应力作用下，由北西西向临汾–浮山断裂作右旋正断错动发生的，震中在临汾东南的东邓一带，地震遗迹和断层活动沉降数据表明，临汾–浮山断裂的7$\frac{1}{2}$以上地震的重复间隔在 14000a 以上。

浮山断裂和大阳断裂是临汾盆地东缘主要组成部分。浮山断裂的主要活动期为中—更新世及其以前，晚更新世以来断裂的活动性逐渐减弱。大阳断裂带是由北北东向的太阳断裂和北东东向大阳镇断裂和曲亭、淹底断裂等组成，其中大阳东断裂的主要活动期为中更新世，晚更新世以来活动较弱。大阳镇断裂和淹底断裂是临汾盆地东缘晚更新世—全新世时期较为活动的两条断裂。

霍县、观堆至洪洞广胜寺、虎头山一带，地震形变遗迹包括滑坡、基岩地裂缝、地表断层和地震陡坎、年轻小冲沟的右旋错动，基岩眉脊面、地震构造楔、最新崩积楔、沙土液化及地表破裂带内的落水漏斗等，地震所产生的水平右旋位移值在 4.0—8.6m 之间，最大值可达 7.2—8.6m，震中位于剪切活动最为强烈的柏亭、石门峪一带。

其中部分地段断裂隐伏地下，地表迹象不清，对张堡断裂、大阳断裂、苏堡断裂和汾河断裂的浅层地震探测结果表明，苏堡断裂东部深度在 35m 反射波组有一明显的错断，断距约 10m，大阳西断裂在 200m 深的反射组成有断裂反应，且形成一个楔状体。

五、地壳上地幔构造

本区地壳厚度东薄西厚。上地幔顶界起伏具有明显的分区性，与本区中新生代的大地构造分区基本一致。汾渭带斜列在莫霍面总体西倾的背景之上。地壳密度呈层块状结构，临汾盆地上地壳下部和太行–五台块体的上地壳底部至中地壳存在有低密度层（体）。

临汾盆地及外围 23 个大地电磁测深点的数据处理结果揭示，地壳电性结构横向变化大，分区性好。壳内高导层的埋深与低密度层变化剧烈的部位，地震活动性强。上地幔高导层埋藏深度，南部运城盆地一带为 85—90km；中部侯马–河津凹陷一带为 100—120km，总体上北浅南深。

山西断陷带中南段地热场的基本状态是：各盆地内部大地热流或地温梯度值都比较高，吕梁山隆起区和太岳山隆起区则比较低。采用逐步逼近法计算了浮山—临汾—蒲县剖面二维岩石圈地温结构。并用临汾断陷盆地、吕梁山隆起区、太岳山隆起区的大地热流值

推导算出了岩石圈厚度和底部温度。

航磁发现，在磁界面深度图上，诸断裂均向西北方向倾斜；而在密度界面深度图上，断裂转向东南方向倾斜，断裂的水平位置可能发生大规模的位移。

穿越霍山山前断裂和洪洞大震的历史震中布设了一条近东西向地震转换波测深测线，结果揭示，洪洞大震区存在一组陡立的超壳断裂。断裂两侧断裂显著，中地壳厚度变化大，下地壳和上地幔存在局部隆起，上地壳和上地幔分别存在低速层；下地壳和上地幔顶部波速偏低，因此温度可能较高。

利用代数重建方法处理临汾台网地震资料和联合反演速度与震源位置的结果表明，临汾地区速度结构纵向横向具有非均匀性，盆地之下速度分布较低，特别是临汾、洪洞一带，在 10km 深度以下有一低速异常区，且向下发展；而盆地两侧地区的地壳速度普遍偏高。其高速异常界面位于临汾盆地之下，地震分布在纵向形成明显的反"Y"型边界。东边界对应的断裂倾角都很大，西边界在浅部对应罗云山断裂，其北段、中段的断层面比南段相对较陡，并且有铲形特征。

近代地震学研究认为，未来可能发生大震的震源区必须具有两个基本条件：介质较为完整，应力高度集中，即震源区具有足以积累大量弹性应变能的介质条件和力学条件。对临汾盆地及其邻区小震震源参数、介质参数的研究表明，该区平均 Q 值超过 200 的区域是河津凹陷及其附近（215），辛置凸起至霍县、灵石隆起（274），平均应力降超过 3×10 Pa 的区域是万荣侯马、运城一带（37.8×10 Pa），此外沁源、安泽附近的平均应力降高，平均 Q 值也较高。盆地内的平均应力降和平均 Q 值较低，相对来说盆地南半部的平均 Q 值高于北半部。

综合上述资料可知：临汾地区地壳处于特定的构造环境中，盆地区为两个独立的块体，其密度低于两侧山区，并处于高地温场中。块体在地壳的 10—20km 间为高导低速层体所分割，成为可调整位移的自由底界面。

六、震源介质特征及其力学性质

临汾盆地近期小地震定位结果表明，和华北其他地区一样，地震大多数发生在新构造活动的局部断陷区内，震源都位于深部的结晶基岩中，并在地壳垂直剖面上显示出层状分布趋势，其深度通常为 10—25km；其中 60%的地震发生在 10—20km 的深度范围内。大多数事件分布在盆地西半部，在 35°53′N—36°00′N 之间存在一个活动性甚低的空段。

临汾地区的地壳呈现明显四单元结构状态，孕震层主要由太古宙结晶岩石组成，盆地边界存在着早期韧性剪切带和后期脆性破裂带，底边界为高导低速层体。

在临汾地区，受霍山山前断裂带、罗云山断裂带和苏堡断裂带交切分割的四个层块状岩相结构体，介质的应力支撑强度各不相同；其中吕梁山块体和霍山-太行山块体属强应力支撑岩相结构体，具有较大的刚度；而临汾块体和洪洞块体就其岩相本身也属强应力支撑块体，其强度明显低于同深度的前者，从而构成盆地周围高环境刚度的格局；断裂带内的石英变形相和石英斜长石变形相的介质强度是该区震源区应力支撑强度最弱的介质，而且在盆地地区地壳和断裂带下部 11—14km 深度上存在高导低速体，受到明显高于两侧山

区的地热场的影响，其力学性质的差别进一步增大，介质的应力支撑强度进一步降低。

研究表明，临汾、洪洞地区的盖层和结晶基底的层状结构是明显的，6km 以上的浅表都由未变质的沉积岩组成，6km 以下的介质层即孕震介质层相对复杂得多。结晶基底中 6km—Moho 面间岩石的变质程度有明显差别，6—14km 为中压角闪岩相+绿片岩相叠加带；15—18km 为角闪岩相+绿帘角闪岩相叠加带；20±2—30km 为角闪麻粒岩相带；30±2km—Moho 面为麻粒岩向带。6—18km 间含水矿物的状态有明显差别，根据盆地区的地热增温测算，6—18km 深度范围为大量退变质矿物出现带。

鉴于临汾盆地地壳内可能存在流体，以实验模拟的手段研究了这种流体对粘-滑活动的影响。其结果表明，临汾盆地的温压条件不易使高压低温型粘-滑过程产生，如果这种粘-滑过程发生，流体的介入对之起着减缓乃至抑制作用。对于深度浅而较松散的介质来说，水的突然介入会使其强度降低，从而产生小能量地震。但这种情况的发生以断裂构成水的通道为条件。基于速度弱化机制的模型估计，在有水情况下，临汾盆地的小能量地震的孕震深度范围大致为 5—10km。

蠕变实验表明，该范围内的缓慢蠕变（例如应变速度为 10—14／s 的条件下）强度远低于岩石的摩擦强度，特别是 20km 左右的蠕变强度低到几个 MPa，从而为孕震层的应力积累提供了条件。

对临汾地区六种主要地壳岩石进行了不同温压（深度）条件下的变形破坏三轴实验获得了它们在该地区不同埋藏深度所具有的抗压、抗剪强度和摩擦强度的变形破坏行为，给出了各自不同的弱化区域，用于解释该区发生强震的机制及壳内可能的孕震层。

复杂结构的变化过程，总是由开始的多点滑动到后来的局部化，粘滑事件的时间序列特征有一个从间隔不规则向准周期演进。只有从单一活动的断层来看，才有可能在一定的条件下出现重复发生的地震活动。将临汾地区 1303 年和 1695 年两个历史强震看成在千年量级上重复发生地震的两条相关断层上的事件是合理的，它们之间的事件间隔不属于单一断层活动中"粘滑"的周期，因此距 1695 年已近 300a 的今天，也就不会"必然"产生新的大地震事件。以岩石学、地球物理测深和高温高压实验研究的结果所建立的临汾地区地壳岩石组成的三维模型，该区地壳岩石在变形破坏和摩擦滑动过程中易于产生失稳的区域，可作为发生地震危险的基本背景；并认为壳内高导层（体）内不会有强震发生，深度大于 20km 也不会有强震发生。依据该区域范围内地壳主要岩类的极限差应力模型估计，地震危险区主要集中在盆地以内，并以洪洞、临汾东侧和襄汾之北为重点区。

研究这两次地震的闭锁结构和解锁过程，以解释两次特大地震在 392a 内重复发生的特定条件。其结果表明，两次地震属原地重复发生，两次地震的震源深度分别为 17km 和 15km，它们的烈度等震线Ⅸ度以上震极区重叠 65%，Ⅶ度以上破坏区重叠 60%，从震源体概念考虑属原地重复发生型。洪洞地震烈度等震线的长轴走向为北北东向，临汾地震则为北西西向，以此推断发震断裂走向，两次地震的发震断裂呈高角度相交。临汾盆地的地震活动，反映了两次地震的孕育过程，从公元 780—1180 年，地震活动很弱，处于积累应力的稳定状态，1181—1303 年连续发生 3 次 $M \geqslant 6.5$ 级地震及一些 5 级左右的地震，开始处于非稳定的应变释放的前兆阶段；1695 年以来到现在的 293a 中，地震活动很弱，处于剩余应变的释放阶段。从应变积累到能量的全部释放的全过程周期大于 2000a。根据邻区的海原断裂、华山山前断裂、贺兰山东麓断裂带和小江两支断裂的特大地震复发间隔的计

算和比较，其重复发生周期平均为2000a左右。

七、地震活动性和未来活动趋势

华北历史地震百年尺度的第Ⅲ与第Ⅳ地震期均可划分为3个阶段，即平静段—过渡段—活跃段；而10a尺度的幕式地震活动仅仅出现在活跃段内。

山西地震带强震活动特征分析表明，山西带目前正处于一个地震活跃期呈指数型分布的一个轮回的开始阶段，强震活动的水平较低，出现强震连发的高潮活动迹象不明显。从强震破裂区分布看，该带上今后7级地震的危险区主要有两个，其一为北京以西至晋、冀、蒙交界一带，另一个是晋中及周围地区。用HB值作为早期震兆的一种尝试，对华北地区第三活动期以来7级以上强震震例研究表明，强震的早期活动亦有一定增强与平静的震兆显示。

华北进入第Ⅳ活跃期以来，平原地震带上相继发生了强震，但是山西带上只发生了30多次中强地震，其中6级以上地震2次，在这个活跃期中渭河、临汾等盆地显示了较低的活动水平。

利用极值理论、最大熵原理、莫尔纳方法、马尔可夫模型和伯努里模型方法计算了山西地震带未来100a内中强震的年平均发生率、平均重现期和发震概率。利用1480—1990年的地震资料计算结果表明，未来100a内，山西地震带将发生$\geq$6.0级地震7个，发震概率为0.95左右；有可能发生$\geq$7.0级地震1次，发震概率为0.63左右；发生$\geq$7.5级地震的可能性不大，发震概率为0.15左右。

在收集大量山西地区近年来的地震地质、地球物理和地震活动等多方面研究成果的基础上，应用图象识别中的COAR-3方法，采用综合决策判别方案对本区进行了图象识别空间扫描，在诸多因素中，选取出山西地区6级以上强震潜在震源区的判别特征，并对其特征进行了研究分析，得到山西地区强震潜在危险区的预测图，并揭示出山西地区6级以上强震的发生，与山西的地壳结构、地质构造、地震活动性和深部地球物理场有密切关系。

从地震区地震活动时空变化特征分析，长期为地震活动的空段图象可以看成是潜在震源区的标志。也就是说，在一个活动期后期，空段往往形成强闭锁区，而平静现象可能反映了低应力背景下的闭锁，临汾地区目前尚未出现类似的空段图象，因此发生7级以上的强震的可能性较小。

八、临汾地震小区划

在区域工程地震环境研究的基础上，通过对汾河以西、罗云山山前、汾河两岸、临汾市区等场地地震工程地质环境特征及其评价、场地动力特性测试及分析、地震反应分析和设防区划；埋藏地形近源地震动效应三维有限元分析、场地地震地质灾害评价和场地综合地震小区划等方面研究，进行了临汾市的地震区划，最终成果为包括基础图系、专业预测图系和综合区划图系三部分22张图组成的小区划图系。它是以场地工程地震环境为基础、以场地地震效应预测为重点、以场地设防参数预测为主要目标、满足于地震工程及抗

震防灾规划等需要的综合区划成果。

临汾市区划场地跨山前洪积扇、Ⅱ级阶地、Ⅰ级阶地和河漫滩四个基本地质地貌单元(蒋溥等，本文集)。

四个地质单元34个地震反应计算点表明，影响地震反应特点的主要场地因素来自两个方面，其一是不同地质地貌沉积单元所显示浅层岩性组合差异；其二是第四纪以来沉积厚度特别是北北西向断裂所构成的地堑沉积。以此为基础，求出场地地震影响系数（蒋溥等，本文集)。

动态有限元法分析临汾盆地场地条件对近场强地面运动影响，反映了覆盖层厚度和断层倾滑运动时上盘对地面运动的影响。

四个地质地貌单元地震地质灾害预测表明，在Ⅷ度条件下，河漫滩显示中等至严重液化，而Ⅰ级阶地为中等到较微液化，广大Ⅱ级阶地和洪积扇，除局部地区外，均为非液化区。在Ⅸ度条件下，严重液化和中等液化范围有所扩大，对Ⅱ级阶地，仅仅是轻微液化区，洪积扇仍为非液化区。考虑到松散沉积物发育特点和地震断裂发生的可能性，划分出沿阶地前缘和古地震断裂带的不利抗震地段，而临汾大部分地区，属对抗震有利地段。

为了合理进行临汾市地震区划和防震减灾、土地利用，根据场地地震工程地质、地震反应、可液化土层及其他场地破坏效应引起的地震地质灾害等专题研究成果并考虑到工程应用的需要，进行了综合区域划分，以综合小区划图的形式，作为临汾市地震小区划的最终图件成果。该图以综合的、宏观为主的工程地震环境为基础，展现了与地震效应预测、抗震设计、抗震防灾、场地评价等方面有关的定量参数。

九、地震灾害预测

临汾市位于高烈度地震区，在我国第二代地震区划图上属Ⅸ度地区。70年代以前建造的房屋绝大部分没有设防，由于抗震规模的限制，截止1990年临汾市超过四层的砖结构房屋很少。根据房屋普查资料，临汾市各种类型的结构所占比例如表1。此表反映了临汾市房屋建筑的概况。

表1　临汾市房屋结构类型比例表

结构类型	占全市总建筑面积的比例
钢和钢筋混凝土结构	0.57%
钢筋混凝土结构	7%
砖混结构	38.5%
砖木结构	50.7%
其它结构	3.16%

临汾市的生命线工程主要有供水、供电、通讯和交通。供水主要干线有40余公里；市内道路14条，公路桥6座，铁路桥6座；供电主要由省区域电网供电。

本项目中的地震危险性分析研究采用了概率方法，结构易损性和生命线工程的易损性分析采用的也是概率方法，所以由地震危险性和结构易损性两部分组成的地震灾害及经济

损失的预测研究是一个完全的概率方法。在城市地震灾害预测工作中采用完全的概率方法在国内是首次，这项工作使城市震灾预测工作上了一个新的台阶。这种方法在震害预测中不仅可提供各种烈度下的震害和损失，而且可以给出在确定的时间尺度内损失的期望值，它对确定减轻地震灾害措施的投入有重要意义。根据地震危险性分析和地震灾害损失预测结果，在这项研究工作里对防灾措施标准的效益进行了研究。根据现有的资料表明，临汾市按Ⅷ度设防地震损失和设防投入之和是最小的；所以得出Ⅷ度是临汾市最合理的设防烈度。如果临汾市的基本建设的年增长速度按 6%计算，从Ⅸ度降为Ⅷ度设防，每年新建房屋因设防投资可节约 1000 余万元。这对加速临汾的建设是非常重要的。

根据结构易损性的分类原则，将临汾市的房屋建筑分成了六大类，分别给出了它们的震害距阵和在不同烈度下的各种破坏程度的数量。对地震时不能间断使用的重要建筑物，如救灾的指挥部门、消防部门和主要的医院等，分别给出了它们的震灾预测结果，并提出了这类结构的震害分析方法。地震时容易引起次生灾害的容器和特殊构筑物，如大型储油罐、高炉和高架管道等，进行了在不同烈度下地震应力分析，提出判别震害等级的方法和震害结果。对生命线系统中的主要建筑物、桥梁、构筑和设备以及管网，分别分析了它们在不同烈度下可能发生的震害。表 2 和表 3 是对临汾未来地震可能造成的经济损失和人员伤亡的预测结果。

表 2　地震经济损失（万元）

烈　　度	经济损失（万元）
Ⅵ	10510
Ⅶ	22823
Ⅷ	46156
Ⅸ	68916
Ⅹ	101773
期望值	14322

表 3　地震造成的人员死亡和无家可归人数

烈　度	死亡人数(人)	无家可归人数(人)
Ⅵ	8	16193
Ⅶ	98	38326
Ⅷ	400	51674
Ⅸ	1963	79673
Ⅹ	3451	141762
期望值	181	19102

临汾市目前有 3%左右的年久失修的老旧房屋，这是未来地震灾害和人员伤亡的主要根源之一，应及早制订更新这些建筑的规划。另外，通过这次震害预测分析发现，生命线工程中的供水系统有一些薄弱环节，在地震时这些薄弱环节会给供水系统造成断水，将给人民生活和生产以及震后恢复工作造成困难。这应是今后城市建设中逐步改造的部分。

通过这项研究，对临汾市的总体抗震能力有了全面了解。由于临汾市大部分位于较好的场地上，大部分房屋低于四层；80 年代以后建的房屋绝大部分按抗震规范设了防，总

需要全本请访问 www.ertongbook.com