

国家自然科学基金项目
宁夏回族自治区人民政府 联合资助
宁夏科技攻关项目

袁丽侠 著

宁夏地震 诱发黄土滑坡 图集



地质出版社

宁夏地震诱发黄土滑坡图集

The Atlas of Loess Landslide Caused By Earthquake In Ningxia

袁丽侠 著

地质出版社

·北京·

内 容 提 要

本书以图片的形式展示了宁夏南部由地震引发的滑坡类型,并分析了其形成原因,阐述了地震诱发黄土滑坡的综合致灾机理,对于研究黄土高原强震区滑坡灾害的发生规律及防震减灾工作具有一定的参考价值。

本书可供从事黄土高原环境、生态研究及地质灾害防治的高等院校师生及相关人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

宁夏地震诱发黄土滑坡图集/袁丽侠著. —北京:地质出版社, 2006.10

ISBN 7-116-05030-2

I.宁... II.袁... III.地震危险区-滑坡-宁夏-图集 IV.P642.22-64

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第125129号

NINGXIA DIZHEN YOUFA HUANGTU HUAPO TUJI

责任编辑:孙亚芸

责任校对:刘艳华

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号, 100083

电 话:(010)82324508(邮购部);(010)82324569(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010)82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本:889mm × 1194mm 1/16

印 张:4.25

字 数:120千字

印 数:1-600册

版 次:2006年10月北京第一版·第一次印刷

定 价:30.00元

ISBN 7-116-05030-2/P·2744

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社出版处负责调换)



袁丽侠，宁夏中卫人，1954年生，宁夏大学研究员，工学博士，国际工程地质与环境学会(IAEG)中国专家组专家。1975年毕业于西北大学地质系，2005年在西北大学地质系获博士学位。曾独立主持完成近百项工程地质勘查和试验项目，在高等院校从事科研和试验教学工作。曾赴墨西哥、意大利等国家和地区参加学术研讨会。主持过国家科委国际合作、国家自然科学基金、宁夏自然科学基金、宁夏科技攻关等项目的研究。发表有关宁夏地质灾害和工程治理方面的学术专著一部、论文十余篇，获国家省部级自然科学优秀论文一等奖、二等奖、三等奖等，获科研成果一项。

作者和女儿崔星是西北大学的校友，她们同时分别获得博士和学士学位。宁夏女孩崔星帮妈妈完成了许多技术工作。



Yuan Lixia, born in 1954. She is a researcher of Ningxia University, and an expert of Chinese Work Group of IAEG. She graduated from the Department of Geology of Northwest University in 1975, and got PhD. in 2005. She has completed near hundreds of engineering geological exploration and trial items independently. She has been to Mexico, Italy to attend international meetings. She has published one academic work and more than ten thesis, and got first, second and third prizes of excellent papers.

前言

我国是世界上黄土最发育、黄土层位全、厚度大的国家。宁夏南部黄土丘陵区,面积约为一万七千多平方千米,位于黄土高原的中北部,由于地处中国南北向地震带的北部,区内新构造运动活跃、地震频次高、强度大,成为令人瞩目的欧亚地震区——六盘山地震区。强烈的地壳差异升降运动使宁夏南部黄土丘陵区沟壑纵横,地面切割破碎度大,黄土覆盖区广泛发育的临空不稳定面易导致滑坡和崩塌的发生和发展。

宁夏南部黄土丘陵区的黄土成壤作用弱,具大孔结构,质地疏松,粒度较粗,垂直节理发育,胶结程度弱和抗冲蚀性差。低湿度、非饱和黄土所具有的强自重湿陷性、强震陷性和地震易损性等工程地质特性使其在我国黄土中占独特地位,宁夏南部因而成为地震破坏及灾害频发的敏感区域。

作者在对海原大地震诱发的黄土滑坡进行潜心研究之后,著有《宁夏地震诱发黄土滑坡》一书,认为宁夏地震诱发黄土滑坡的形成机理主要表现在以下方面:

(1) 构造应力场的作用是形成机制之一:西吉县位于海原断裂带与近南北向六盘山断裂带的交汇部位,是海原大地震地应力调整场内弹性应变能积累和储备的枢纽地带,这里地震能量施放最大,应力最集中。北西—北北西向的张应力为该区大规模滑坡提供了空间,在强烈的新构造运动作用下,位于海原大地震极震区东南部的西吉成为1920年海原大地震诱发黄土滑坡最发育、规模最大的地区。

(2) 黄土显微结构特征是形成机制之二:西吉黄土是位于黄土高原六盘山以西过渡地带黄土堆积中最独具特色的黄土。其黄土显微结构类型、颗粒排列、胶结物类型、颗粒成分、孔隙率及孔隙类型等三维空间结构有其自身的特点,大孔-支架、支架-镶嵌结构、小桥式连接、胶结程度低等特性,是造成该区黄土具有大孔隙、疏松、低含水量、强湿陷性和强震陷性等独特物理力学性质的内因。

(3) 地震波的放大效应是形成机制之三:特殊的黄土微地形地貌、厚层黄土覆盖等地质背景条件,造成海原大地震时地震波动能在该区被激化、放大的灾害后果,黄土梁、峁的顶部及边部、厚层黄土覆盖区损失严重。黄土场地地面运动周期增长、强震地面运动的低频成分增加、高烈度异常使黄土层总体刚度减弱或消失,滑坡是黄土坡失稳的方式。研究认为:西吉县地震诱发黄土滑坡的主滑面和主滑方向是与地震波的传播方向相反的。

(4) 震前突发地下水异常是形成机制之四:根据1920年海原大地震前出现的包括地下水异常在内的震前宏观灾害群发现象,探讨了震前宏观异常群发的相关性及其震前水异常与黄土液化引发滑坡的关系。从地震引起黄土液化的角度论证:在地震动应力和震时突发水异常的共同作用下,由于黄土液化而形成了高速、长滑距巨型黄土滑坡。黄土液化不同于砂土液化的机理在于黄土的不完全饱和、可溶盐的溶解、大中孔隙的崩溃及微小孔隙充水形成孔隙压力的消散是黄土液化的特点。

基于上述研究成果,作者进一步深入调查了海原大地震诱发的黄土滑坡,对发生在海原大地震极震区东南部的海原、固原、西吉县、彭阳县境内的地震诱发黄土滑坡类型进行了形态特征的划分,用图片的形式表现每一种滑坡类型的特点,所配文字说明既有分析研究,又有形态描述,表现方式直观、简洁,将自然界中错综复杂的滑坡现象进行科学的归类,阐述了地震诱发黄土滑坡的综合致灾机理。

本书图集内容包括五部分:①西吉地震诱发的黄土滑坡;②石碑塬低角度大面积滑移;③深切层黄土滑坡;④地震诱发滞后黄土滑坡;⑤人类工程活动加重了滑坡灾害。

第一部分西吉地震诱发的黄土滑坡照片集中表现了海原大地震中黄土滑坡灾害中规模最大、密度最

高、范围最广的地震诱发黄土滑坡群，位于海原大地震极震区等震线轴的南部、西吉县的西南部。沿湫泥河流域的右岸发育着缓坡、高速、远程巨型滑坡，这类滑坡有其自身的形态和特点：在巨型滑坡中由数个不同形态的单体滑坡组合而成一个大滑坡，也有两个大滑坡对接形成一个大滑坡，或单独的复式滑坡，这是海原大地震诱发的黄土滑坡中最严重的滑坡灾害类型。另外，在沿西吉西南部湫泥河流域左岸还发育着一种陡坡、短滑程的滑坡：其形态特点既有单个的圈椅状典型滑坡及三个单体滑坡组合而成的一个优美圈椅状连体滑坡，也有似一道陡壁沿谷坡坡肩绵延千米的滑坡。

第二部分固原石碑塬低角度大面积滑移照片集中展示了发生在极震区等震线轴东部、清水河Ⅳ级阶地上黄土塬边的大面积低角度黄土滑移。图片表现了海原大地震后发生在该区的黄土低角度列阵式滑移，由东向西滑动的滑移块体在大的区域性波状起伏带中套有小的有规律的、节律感很强的滑移。

第三部分中主要表现了发生在海原大地震断裂带附近的海原县蒿艾里、菜园西北的深切层黄土大滑坡，滑动面切穿黄土层直达其下伏的白垩纪泥灰岩中，巨大的滑坡体堵塞了河道，形成李俊海子地震堰塞湖。

第四部分是分布在固原以西彭阳县的地震诱发的滞后黄土滑坡，这种滑坡的发生是由于当年海原大地震中已经被震酥的黄土斜坡上布满了大小不一的裂缝，在强降雨的诱因下裂缝扩大、加深直至失稳、塌落而发展成为新滑坡。图集中采用了2005年彭阳滑坡发生时，彭阳县电视台实地拍摄的滑坡从发生到结束的整个过程的截屏图片，真实地再现了黄土滑坡的动态发展过程。

第五部分显示了人类的工程活动加重了滑坡灾害的发生、发展，人们应控制自己的行为减少灾害发生的可能性。

图集中所有的图片（除彭阳外）都是作者深入到黄土滑坡重灾区现场拍摄的，拍摄手法自然、写实。作者从科学的角度真实、自然地反映了地震诱发黄土滑坡的独特形态，首次将宁夏南部黄土丘陵区地震诱发黄土滑坡的自然景观展现给世人。本图集为黄土高原强震区地震诱发黄土滑坡的深入研究、防震减灾、国防工程、基本建设和科普教育提供了珍贵的科学资料。

感谢国家自然科学基金委员会的资助，感谢宁夏回族自治区人民政府的关注和多方支持，感谢宁夏大学及朋友们的帮助。

2006年10月中秋于银川

Introduction

China is a country of a loess developed most in enough strath horizon and thickness in the world. The area of loess hills in south of Ningxia is about $1.7 \times 10^4 \text{ km}^2$. It locates in loessial plateau from the middle to the north, where is the north part of the N-S earthquake belt in China and the new tectonic movement is active, so it became the focus of attention of the people in Europe-Asia earthquake zone which is called Liupan mountain earthquake district. The strong elevation and subsidence make gullies everywhere in south of Ningxia loess hills, and the loess ground is broken up. The unsteady surfaces everywhere make the slide and collapse happen easily.

The pedogenesis of loess is weak in south of Ningxia, with structure of having big holes and open packing. It has coarse grain and well developed vertical joint with weak ability of cementation and erosion resistant. The character of low humidity, heavy weight of itself and easily damaged make it occupy a special position in Chinese loess. The south of Ningxia is a sensitive area to disaster of earthquake.

I have devoted myself to study the landslides caused by Haiyuan earthquake happened in 1920 and published a work of "The Loess Landslide Caused By Earthquake in Ningxia". I think the mechanisms of sliding in Ningxia are the followings.

(1) The tectonic stress. The Xiji county is locate the convergence of Haiyuan fault and N-S faults of Liupan mountain, where is the district of earthquake energy concentrate to adjust and relax. The NW-NNW tensile stress provide driving force for landslide. In the function of new tectonic, the southeast of Xiji became the area where the scale of landslides is most big which were caused by Haiyuan earthquake.

(2) The microstructure of the loess. The loess in Xiji has the most characteristic in the west of Liupan mountain. The three dimension structure of big-hole, trestle, inlaying each other, bridge linking and weak cementation of the loess are the causes of its special physical mechanics.

(3) The wave's enlarging effect. The special landform and the thick layer of loess made the wave of earthquake energy enlarged and produced worse disaster. The prolong of moving time of earth, the increasement of low frequency and the abnormal of high intensity made the whole rigidity of loess reduce of disappear, sliding is the way of the loess hill destabilization. It is thought that the main surface and sliding direction are contrary with the spreading direction of the earthquake wave.

(4) The abrupt abnormal of groundwater before earthquake. Both in the function of abnormal groundwater and earthquake stress, the liquefaction loess slided developing high speed, long distance giant landslides. The mechanism of loess liquefaction is different from that of sandy soil, because there are salt dissolved in the loess and the breaking up of big-middle holes, full of water of small holes, which made the pore pressure disappear.

According to the above-mentioned research results, I classified the landslides in Haiyuan, Guyuan, Xiji and Pengyang counties caused by earthquake by shapes, trying to show people the character of the landslides in pictures with simple analysis words and to make clear of the compound mechanism of landslides disaster caused by earthquake.

This atlas includes five parts. (1) The loess landslides in the southwest of Xiji county. (2) The Shibeiyuan loess landslides. (3) The deep cutting loess landslide. (4) The lagging loess landslides. (5) The unreasonable mankind activities made the disaster worse.

Part (1) show the biggest landslides group caused by earthquake in the southwest of Xiji. They are character with low angle, high speed and long distance, developed in the right shore of Lanni river. Some of them are

consisted of several single landslides, some were formed by two landslides sliding on opposite direction, and some are compound landslides. They were the worst disaster caused by Haiyuan earthquake. There is another type of landslide in the left shore of Lanni river, which is character with high angle and short distance. Some of them have shapes of single round-backed armchair, some are linked round-backed armchair, and some extends long without backwall.

Part (2) show the low angle sliding in a big area in IV terrace in Qingshui river, which movement in rhythm.

Part (3) show deep cutting landslides in Haiyuan county, which cut into the underlaying Cretaceous marl. The giant landslides blocked the course of river and formed Lijunhaizi barrier lake.

Part (4) show lagging landslides in Pengyang county. After the earthquake, the cracks developed everywhere in the loess, when there was strong rain, the new sliding happened. There are some pictures got from TV screen of a real sliding recorded by Pengyang TV Station in 2005.

All the pictures, except of some from Pengyang TV Station, were taken by the author on the scenes. The pictures show the special shapes of the landslide actually. It is the first time to show people the nature scene in the south of Ningxia. This atlas will provide science data to research the landslides, to reduce the disaster of earthquake, to construct the house, and also to science popularize.

This work was supported by NSFC, Ningxia Hui autonomous government and Ningxia University many. I would express my most thanks from heart to them.

Yuan Lixia

in Yinchuan
Mid-Autumn, 2006

目 录

前 言

1	地震诱发黄土滑坡的地质地貌条件	1
1.1	地质、地貌背景	1
1.2	气候、水文条件	1
1.3	宁夏南部黄土堆积特点及分布概况	1
1.4	宁夏南部黄土的物理力学性质	2
1.5	地震诱发黄土滑坡的分布	2
2	地震诱发黄土滑坡的形成机理	4
2.1	地震波与构造应力场间的耦合	4
2.2	地震波与特殊地形地貌及盆地间的耦合	7
2.3	地震波与黄土显微结构间的耦合	7
2.4	地震波与突发水异常间的耦合	8
2.5	黄土滑坡与地震波传播方向的相关性	8
3	西吉西南地区地震诱发的黄土滑坡	10
3.1	地震诱发的低角度、高速、远程黄土滑坡	10
3.2	地震诱发的高角度、深切层、短滑程黄土滑坡	35
4	固原石碑塬地震诱发的黄土低角度滑移	40
5	地震诱发的黄土深切层滑坡	48
6	地震诱发的彭阳滞后黄土滑坡	50
7	人类不合理的生产活动加重了黄土滑坡灾害	53
7.1	滑坡对农居安全的灾害影响	53
7.2	滑坡引发水土流失灾害	56
7.3	人类不合理的工程行为造成黄土斜坡新的不稳定面	58
	结束语	59
	主要参考文献	60

Contents

Introduction

1	The geological and geomorphologic condition of the loess landslide caused by earthquake	1
1.1	The background of geological and geomorphology	1
1.2	The hydroclimate conditions	1
1.3	The characteristics and distribution of the loess in south of Ningxia	1
1.4	The physical mechanics property of the loess in south of Ningxia	2
1.5	The distribution of the loess landslides caused by earthquake in south of Ningxia	2
2	The formation mechanism of the loess landslide that caused by earthquake	4
2.1	The coupling of the earthquake wave with the tectonic stress	4
2.2	The coupling of the earthquake wave with the special landform and basin	7
2.3	The coupling of the earthquake wave with the microstructure of the loess	7
2.4	The coupling of earthquake wave with abrupt loess liquefaction	8
2.5	The correlation of the loess landslides with the spread direction of earthquake wave	8
3	The loess landslides caused by earthquake in the southwest of Xiji County	10
3.1	The low angle, high speed and long distance loess landslides	10
3.2	The high angle, deep cutting and short distance loess landslides	35
4	The Shibei yuan loess landslide in Guyuan caused by earthquake	40
5	The deep cutting loess landslide caused by earthquake	48
6	The Pengyang lagging loess landslide caused by earthquake	50
7	The unreasonable mankind activities made the disaster of loess landslides worse	53
7.1	The influence of loess landslide to the safety of farmhouses	53
7.2	The loess landslide caused the loss of soil and water	56
7.3	the unreasonable mankind activity made new unstable surface of loess slope	58
	Conclusions	59
	References	60

1 地震诱发黄土滑坡的地质地貌条件

1.1 地质、地貌背景

宁夏南部黄土丘陵区位于青藏高原的北东缘、我国黄土高原的北部,面积约17000km²,海拔2000m左右,由黄土塬、梁、峁地貌构成,包括固原、海原、西吉、彭阳等地。受青藏高原隆升的影响,黄土高原在进入发育期后逐渐开始抬升,区内新构造运动活跃,地震活动频繁,差异升降运动强烈,地形复杂。该区地貌集山地、丘陵、盆地为一体,是欧亚大陆上一个引人注目的地震区,即中国著名南北向地震带的北端——六盘山地震区,其周边地区也是强震多发地带^[1]。截至1976年,在黄土高原及相邻地带共记录了6级以上的破坏性地震51次,其中7级以上的强震22次,8级及大于8级的特大地震6次,1920年海原8.5级地震就是其中之一。

区内剥蚀堆积地貌受六盘山构造控制,黄河支流祖厉河水系、清水河水系、苦水河水系对高原的下切和侧蚀,使之成为以剥蚀为主、地貌特征以缓坡黄土堆积丘陵为主的地区。原生黄土堆积并被侵蚀切割成梁、峁和深沟坡陡,沟壁坡度80°~90°,黄土塬、梁、峁、涧和沟壑交错分布,梁峁坡度一般为20°~30°,区内黄土表面的沟壑密度大,黄土梁峁坡面切割破碎度大于15°^[2]。特殊的地形地貌有利于地表水迅速汇集和侵蚀冲刷,使黄土斜坡形成许多临空不稳定面,为区内黄土滑坡的发生发展提供了重力条件。1920年宁夏海原8.5级地震在极震区9~10度区内的海原、西吉、固原县境内,诱发了世界上类型最全、规模最大、形态多样的黄土滑坡群^[3]。

1.2 气候、水文条件

宁夏南部位于北半球中纬度内陆腹地,为典型的大陆性半干旱气候,干旱少雨,降雪是冬季降水的主要来源。日照充足,年日照时数为2194~3082h。风大沙多,干旱的气候为风力侵蚀创造了条件。南部黄土丘陵的半干旱区,年平均降雨量400~700mm,年蒸发量为1400~2000mm。降水多集中在7~9月份,为突发式区域性倾泄,严重危害黄土斜坡的稳定性,为滑坡灾害的发生发展具备了充分的水动力条件。区内年均5级以上的大风日数在22天左右,干燥度在3.0以上,沙尘暴日数一般为15天。强风的吹扬使土地裸露,导致可利用土地不断锐减^①。

大气降水是地下水的主要补给水源,地表径流沿黄土类土孔隙、洞穴垂直入渗至下伏第三系砖红色泥质岩中。红色泥岩多在沟沿及低洼处出露,为黄土的基地层,颗粒细,可塑性强,厚度大,遇水易软化,黄土与第三系红色泥岩的接触带,常是滑坡体滑动面的构成部位^②。

1.3 宁夏南部黄土堆积特点及分布概况

宁夏南部黄土丘陵区缺失古生界、三叠系、侏罗系、上白垩统及古新统,出露最老地层为中元古代的海原群变质岩(Pt₂hy),以新生界第四系分布最为广泛,约占全部面积75%以上,并不整合于一切老地层之上,控制着大面积黄土地震滑坡的分布。

宁夏南部黄土丘陵区是我国黄土组成的一部分,属风成黄土堆积,Q₃黄土主要分布于深切冲沟内和黄土梁、峁区的上部^[4]。

●宁夏地质环境监测总站,西海固“三角地带”人畜用水水文地质勘查报告,1987。

●宁夏工程地质勘察院,宁夏回族自治区环境地质调查报告,2001。

宁夏南部的黄土堆积主要分布于固原、西吉、彭阳等地,早中更新世黄土零星出露,晚更新世黄土非常发育,常呈披盖状分布在黄土梁峁顶部、黄土梁底坡脚处及沿河谷高阶地之上,或依地形起伏不整合超覆于第三纪红色泥岩之上。

区内黄土成壤作用弱,土层产生不稳定的孔隙,没有明显完整的古土壤层和钙质结核层,最大厚度可达80余米。黄土垂直节理发育,形成陡壁,因接受淋溶较多造成土颗粒间胶结物减少,表现为强自重、非自重湿陷性和强的震陷性。黄土的地震易损性随埋藏深度和堆积年代的增大而减小。宁夏南部风成黄土堆积的底层以不整合与第三系红层接触,海原李俊一带的黄土不整合于白垩系之上。宁夏南部晚更新世黄土是产生地震诱发滑坡灾害的主要层位。

1.4 宁夏南部黄土的物理力学性质

宁夏南部黄土丘陵区早、中晚更新世黄土,发育在干旱、半干旱的黄土梁峁地区。区内黄土特殊的显微结构特征,使其工程地质性质不同于黄土高原其他地区:黄土以粉质颗粒为主, $>0.005\text{mm}$ 颗粒一般占80%左右,天然含水量指标在8%~15%之间,天然孔隙比在0.8~1.3之间,塑性指数(IP)为6~9,压缩模量也较小,湿陷系数在0.157~0.073之间,自重湿陷系数在0.059~0.015之间^[5],强的Ⅱ—Ⅲ级自重和非自重湿陷性及其他特殊物理力学性质使其在我国湿陷性黄土中占有独特地位。宁夏南部黄土颗粒较粗,土质疏松,颗粒较粗,具大孔结构,孔隙率达45%~50%,黄土胶结程度弱,抗冲蚀性差,是低密度高结构性的粉质非饱和黄土。独特的物理力学性质是区内黄土在地震的作用下边坡失稳、强度丧失、产生黄土液化并引发大规模黄土滑坡灾害的内因。

1.5 地震诱发黄土滑坡的分布

1920年12月26日在宁夏海原发生的8.5级大地震,在六盘山以西、南、西华山以南的广大黄土丘陵区诱发了大规模黄土滑坡、崩塌、地裂缝和鼓丘等一系列次生地质灾害。黄土滑坡主要分布在海原大地震极震区等震线轴南部的西吉、中东部的海原和固原(图1.1)。根据滑坡地面调查,笔者将滑坡划分为以下类型。

(1) 西吉黄土滑坡群:是地震诱发黄土滑坡灾害中规模最大、密度最高、范围最广的类型,分布在距震中78km、地震烈度9~10度、位于海原大地震极震区等震线轴南部的西吉县西南部广大地区。滑坡沿湫泥河流域的左右两岸分布,形成波浪起伏的滑坡地形。其中右岸的滑坡群主要发生在原始坡度为 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 的黄土梁峁地区,滑坡规模、滑坡形态、滑距、滑速特征和地下水埋深都与左岸具有极大的差异,成为海原大地震中最典型的黄土滑坡灾害类型。该类滑坡的滑动机理是,地震时突发的地下水异常,使液化后的黄土在巨大的地震动力、重力势能和水力坡度的共同作用下,沿水力润滑面高速滑移形成。

(2) 黄土低角度滑移:发生在极震区等震线轴东部的固原县石碑塬清水河Ⅳ级阶地上,为黄土塬边的大面积低角度($<10^{\circ}$)黄土滑移。滑动机理是,地震造成黄土覆盖层下部的粉细砂层液化后,拖动上覆黄土以低角度列阵式滑移形成。

(3) 深切层滑坡:发生在海原大地震断裂带附近的海原县蒿艾里、菜园西北的深切层大滑坡。滑动机理是,重力垮塌破坏了不同岩土界面的原有结构面,形成深达白垩纪泥灰岩的深切层滑坡。

(4) 地震诱发的滞后滑坡:这种滑坡主要分布在固原东部的彭阳县,其发生机理是,在海原大地震中彭阳地区的黄土斜坡已被震酥,很多黄土斜坡的稳定性已处于极限平衡状态,在以后突发式区域性降雨的诱因下,地表水沿地表裂隙或地震遗留下的张裂隙带下渗至下伏的软硬岩土结合面处,形成滑动面,进而发展成滞后黄土滑坡。

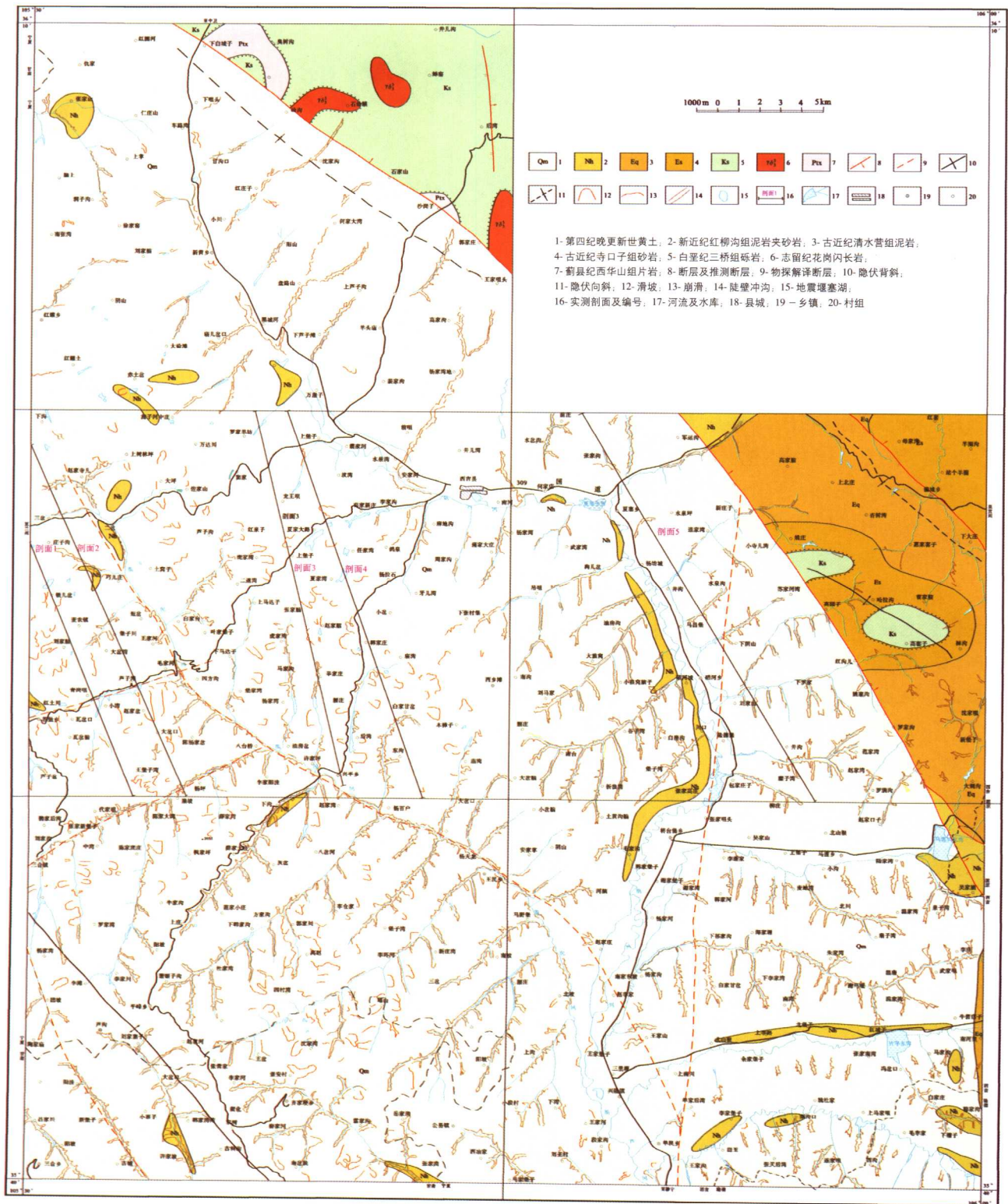


图 1.1 西吉西南部黄土滑坡分布略图

Fig 1.1 The distribution of landslides in southwest of Xiji county

2 地震诱发黄土滑坡的形成机理

作者通过对海原大地震诱发黄土滑坡的调查和研究之后,认为该区滑坡的形成机制主要为以下四个方面。

2.1 地震波与构造应力场间的耦合

从海原发震构造中段向南延伸至固原、西吉一带,是发震构造的东南端应力集中地带,即北西向断裂与多条近南北向断裂的交汇部位,也是北北西向南华山、西华山系与近南北向六盘山脉交汇的弧形构造转折端。区域构造应力场的长期作用使地块之间强烈挤压和错动,在空间上复合交织,多种能量在此耦合、激化,集中反映出地震波与构造应力场之间的耦合信息。宁夏震源机制解释表明:海原、西吉、固原地区的主压应力方向为北东—北东东向,主张应力方向为北北西^①。笔者对宁夏南部地震诱发黄土滑坡的地面调查结果证实:走向北北西的海原地震断裂带在地震诱发黄土滑坡的演化过程中对滑坡的空间集中性具有制约作用,主滑方向与北北东向的区域主压应力轴垂直,沿北西向的区域张应力方向延伸,平行于最大主压应力的北西向剪应力面(图2.1)。

(1) 笔者对西吉县西南部黄土滑坡密集区作了5条滑坡地形剖面图显示,杏树湾—张撇岔剖面线的走向为北西22°,套子湾—兴平剖面线的走向为北西14°,韩家湾—庙湾剖面线的走向为北西24°,新庄山—芦子岔剖面线的走向为北西20°,张家沟—磨子湾剖面线的走向为北西32°。一些典型的巨型滑坡群如党家岔、夏家大路、李家沟等滑坡的主滑面和主滑方向均在305°~340°之间波动^[3](图2.2)。

(2) 固原县石碑塬清水河IV级阶地、黄土塬边的大面积低角度黄土滑移区的主滑方向也是310°左右。研究成果说明:地震波动能量与构造应力场间的耦合制约了黄土滑坡的规模、分布和灾害发育程度。据资料,地震形变带内的挤压鼓包和张裂缝等力学轨迹也呈北西向应力的方向展布。张性地裂缝走向为北东70°~80°,挤压鼓包的走向北西20°,反映破裂是在北东70°~80°方向的挤压作用下产生的^[6]。由于海原地震断裂带的上盘受到的正压力累积最大,是集中释放弹性应变能、形成能量异常聚集带和应力集中的优势部位^[6]。地震波与构造应力场间的耦合是地震诱发黄土滑坡的形成机制之一。

① 宁夏区域地质调查队.海原县幅1:5万区域地质调查报告,1991。

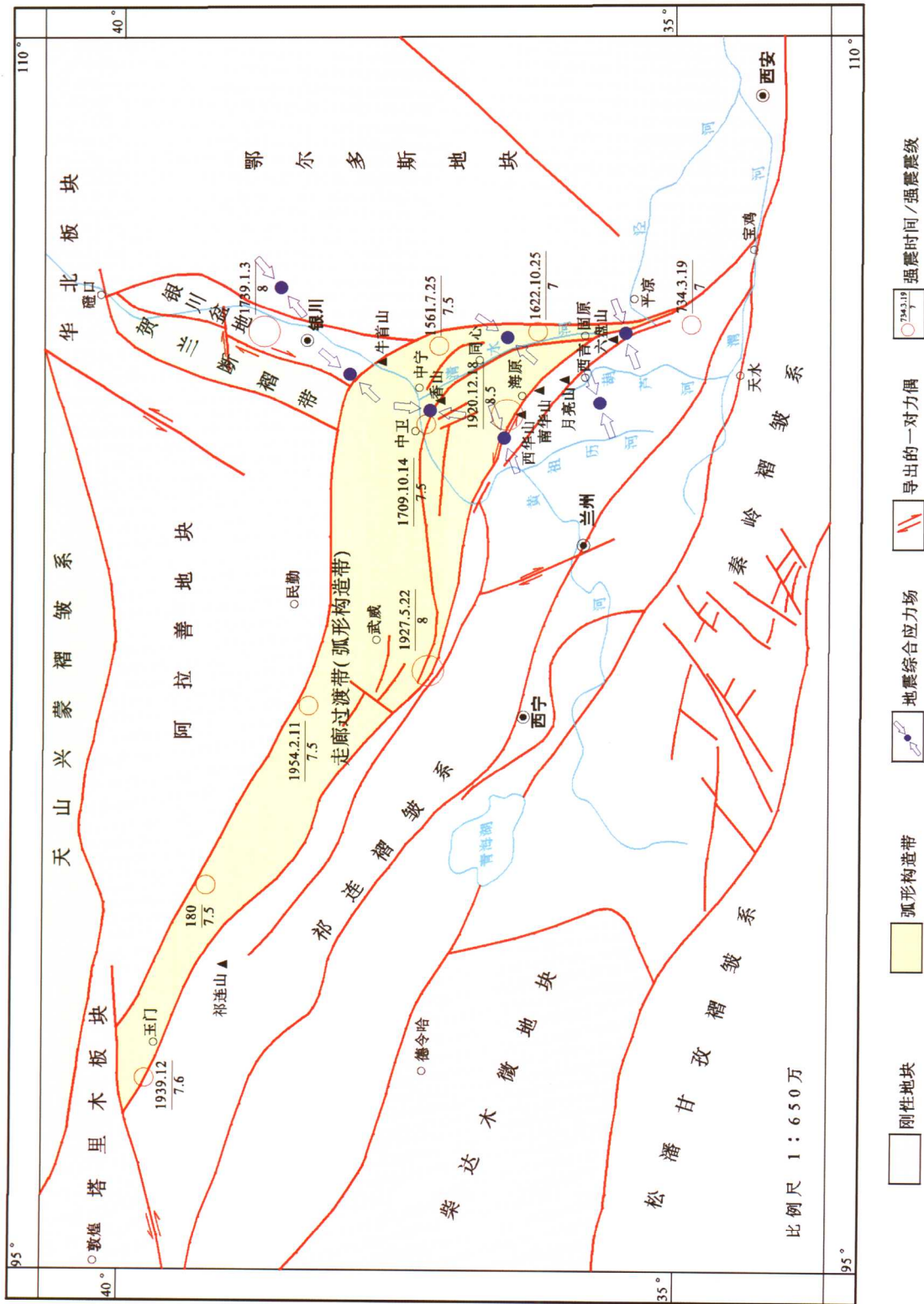
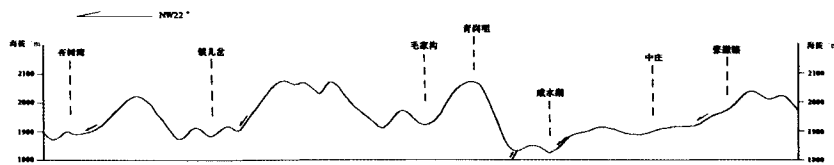


图 2.1 青藏高原东北缘宁夏南部弧形构造带地应力场及作用方式

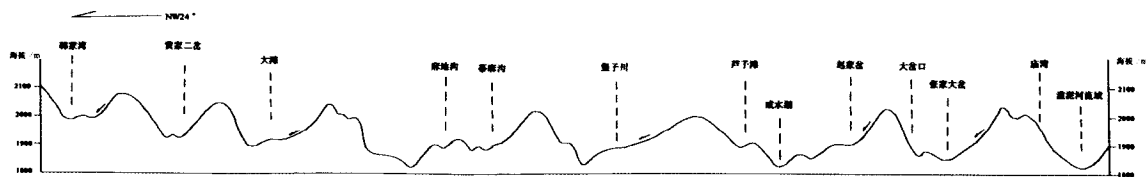
Fig 2.1 The arc tectonic geological stress and its function in south Ningxia of northeast Qingzang Plateau

比例尺 1: 50000

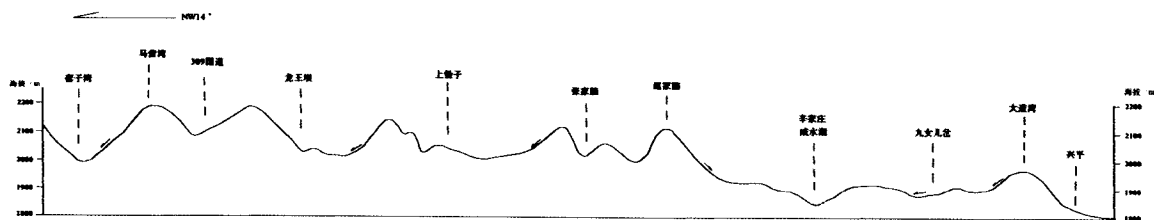
杏树湾—张滩岔剖面



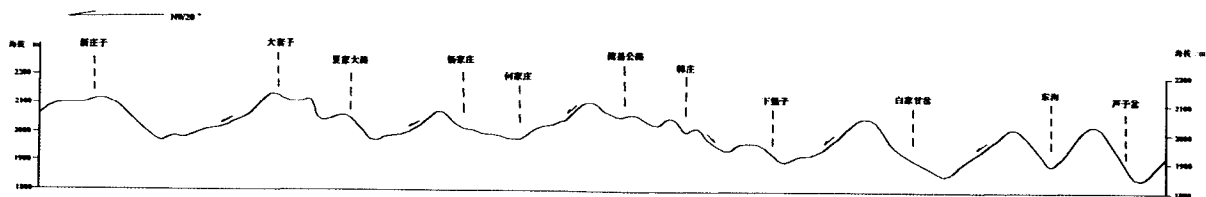
韩家湾—庙湾剖面



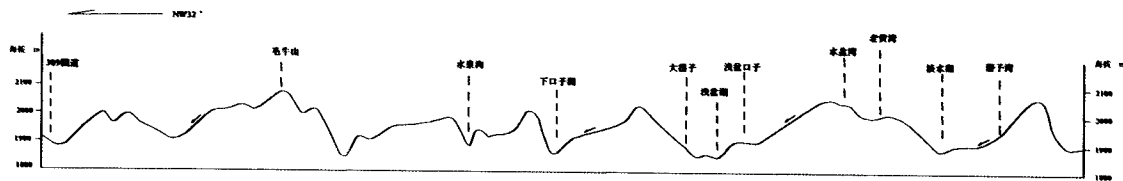
套子湾—兴平剖面



新庄山—芦子岔剖面



张家沟—磨子湾剖面



滑坡滑动方向 滑坡迹线

图 2.2 西吉县西南部滑坡地形剖面

Fig 2.2 The profiles of landslides in southwest of Xiji county