

黄土地区 典型滑坡 预测预报及 减灾对策研究

文宝萍 等著

地质出版社



黄土地区典型滑坡预测预报及 减灾对策研究

文宝萍 李 媛 等著
王兴林 钟立勋

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书在分析研究黄土地区滑坡发育规律、国内外滑坡预测预报研究现状与发展趋势的基础上,引入了黄土地区典型滑坡预测预报研究的思路与技术路线,以黄土地区滑坡发育典型、危害严重的水市市区为研究区,通过滑坡地质结构及变形特征分析、模型实验、数值模拟,对滑坡的形成机理进行了深入研究。通过滑坡变形监测、模型实验和基于岩土体蠕变理论的数值模拟,从滑坡滑动时间、活动强度、滑坡危害三方面,将预测与反演相结合,系统地开展滑坡预测预报研究;以研究结果为依据,从工程和非工程措施两方面,提出了研究区及整个黄土地区滑坡灾害的减灾、防灾对策。本书可供从事滑坡灾害勘察和研究的科技人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究/文宝萍等著.-北京:地质出版社,1997.1
ISBN 7-116-02327-5

I. 黄… I. 文… ①黄土区-滑坡-预测②黄土区-滑坡-对策-研究 W.P642.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 00313 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:于焕新 郑长胜

*

北京地质印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本: 787×1092¹/₁₆ 印张: 6.375 铜版图: 4 页 字数: 150000

1997 年 1 月北京第一版·1997 年 1 月北京第一次印刷

印数: 1—600 册 定价: 12.00 元

ISBN 7-116-02327-5

P·1744

序

本书的出版是我国工程地质界值得庆祝的一件大事，它标志着我国在黄土滑坡的预测预报和减灾对策研究方面取得了重要进展。

滑坡是一种分布广泛、经常发生的地质灾害。在我国各种地质灾害中，其危害程度仅次于地震。也像地震预报一样，滑坡的预测预报是减轻和防止滑坡对人类生命财产造成损失的重要环节，是滑坡研究中的关键问题。近年来，随着人们对滑坡危害的日益重视和“国际减灾十年”活动的开展，国内外对滑坡预测预报研究十分活跃，本书即是其中的代表性成果之一。

我国黄土分布广泛，黄土性质特殊，斜坡常有滑动。尤其是黄土高原地区，沟谷深切，高陡的黄土坡易于发生滑动，往往一夜之间整个村庄就被黄土滑坡埋盖，给人民造成莫大的危害或威胁，迫切需要开展黄土滑坡预测预报及减灾对策研究。同时，黄土滑坡研究在国内外滑坡研究中也占有重要的地位。

本书在深入研究黄土地区滑坡发育特征、分布规律和危害状况的基础上，选择了滑坡发育最多、危害最重的崩滑性黄土-红层接触面滑坡作为研究对象，以滑坡分布密集、灾害不断发生的甘肃省天水市为研究区，以滑坡发育特征明显的孟家山滑坡、锻压机床厂滑坡为研究点，是完全正确的，可谓抓住了黄土滑坡的典型代表。经过作者等集中力量深入研究，时间不长就取得了重要进展。在对滑坡特征全面总结后，提出了“坡体蠕动-后缘拉裂-滑带由中部向两侧发展-剪出口形成-坡体突滑”的斜坡变形破坏发展过程的地质模式。这种模式的正确性已为物理模拟实验、弹塑性有限元数值模拟所证实，并在锻压机床厂滑坡的反演分析中得以验证。这一模式的提出，把黄土滑坡发育规律的认识提高到了一个新的高度，为滑坡预测预报奠定了可靠的理论基础。

在黄土滑坡预测预报方面，本书对滑坡的滑动时间、活动强度、滑坡危害三个方面的预测提出了一套行之有效的研究途径和技术方法，将预测与反演相结合，以滑坡地质模式及变形监测研究、物理模拟实验、滑坡动态演化过程的数值模拟研究为途径，并把三方面研究有机地结合起来，进行了系统深入的分析。尤其以基于岩土体本构特征的蠕变（流变）理论为基础，研究滑坡的演化过程，预测斜坡变形破坏的趋势，更是抓住了滑坡预测预报的本质和突破口。本书的研究结果虽然尚需进一步在实践中检验，但其研究思路和途径具有较高的学术价值和理论意义。

书中还依据研究结果提出了减灾防灾对策的制定原则和具体的措施建议，对天水市滑坡灾害的防治具有重要的应用价值和社会经济意义，也对类似的滑坡地区有参考应用价值。

本书是一本学术水平高、实用性强的优秀专著。它将在国内外滑坡研究中发挥巨大的作用，并受到广大读者的欢迎。

张咸恭

1996年5月

前言

作为一种自然地质现象,滑坡研究由来已久。作为一种地质灾害,对其研究则始自本世纪初。随着人类在山区的开发性工程经济活动强度的增大和频度的增高,滑坡灾害日趋频繁,一次造成数百人甚至上千人死亡、数亿元直接经济损失的大型灾难性事件经常发生,滑坡灾害研究随之逐渐系统、深入。虽然滑坡灾害不像地震、洪水、火山、龙卷风等自然灾害那样引人注目或使人类付出巨大代价,但因其分布广泛、发生频繁,对人类造成总的经济损失却相当惊人,有时甚至不小于其它单一的一类自然灾害。如1995年我国大陆6级以上地震7次,灾害死亡人数85人,直接经济损失11.6355亿人民币;而同年发生灾害性滑坡(广义上的,包括崩塌、泥石流)超过3000次,至少造成776人死亡,直接经济损失大于23.513亿人民币。据统计,美国由于各类滑坡活动,年均死亡人数超过25人,大于地震灾害死亡人数;日本死于斜坡破坏的人数与死于其它所有自然灾害(包括地震)的人数间的比率为26%—54%。为提高全人类的减灾、防灾意识,有效减少自然灾害的损失,1987年12月2日负责联合国经济和财政支出的第二委员会一致通过支持“国际减轻自然灾害十年计划”(IDNDR)的决议,并将地震、火山、龙卷风、洪水、滑坡等灾害定为重点减灾对象。“减灾十年”活动的开展,极大地推动了自然灾害的研究。进入90年代以来,滑坡灾害研究异常活跃。作者等从1986年起,对黄土滑坡的形成机理、预测预报等方面进行了深入的研究。1990年以来,承担国家“八五”科技攻关课题“黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究”,本书是在该项研究成果的基础上编写而成的。

全书分六章。第一章为全书的导论,系统总结、分析了黄土地区典型滑坡预测及减灾对策研究的意义,滑坡在黄土地区的分布、发育规律,国内外滑坡预测预报研究的现状与发展趋势等,引入了黄土地区滑坡预测预报研究的思路和技术路线。第二章全面介绍了天水市区黄土滑坡的分布、发育规律及其在黄土地区的典型性与代表性。第三章为滑坡机理研究部分,从滑坡地质结构、变形特征分析、相似材料模拟实验及弹塑性有限元数值模拟三方面,深入、系统地研究了滑坡的变形破坏机理,分析、建立了滑坡变形破坏的地质模式,为滑坡预测预报研究奠定了正确的地质概念模型。第四、第五章为滑坡预测预报研究部分,在对滑坡变形监测、相似材料物理模拟实验分析研究的基础上,以基于岩土体蠕变(流变)理论的滑坡变形动态过程分析为突破口,通过滑坡的位移、应力及塑性变形分析,预测了不同条件滑坡的灾变时段及相应的灾变表现,估测了滑坡的临滑时段和活动强度,总结了滑坡变形的数字统计规律。第六章为减灾对策研究部分,以滑坡灾害预测为基础,以研究结果为依据,从工程与非工程两方面,提出了天水市区黄土地区减灾、防灾对策的制定原则和具体的措施、建议。书中第一章,第三章第一、第三节,第四章第一、第三、第四节,第五章,第六章,前言及结论由文宝萍编写;第二章由李媛、文宝萍、王兴林编写;第三章第二节、第四章第三节由李媛、文宝萍编写。

参加课题研究的主要人员有地矿部环境地质研究所文宝萍、钟立勋、李媛;甘肃省地

矿局第一水文地质工程地质队王兴林、崔旭东、田志荣、陈汉、赵治江、王世宇、王景辉；中国科学院地质研究所吴玉庚、刘竹华；铁道部科学研究院西北分院徐峻岭、廖小平。此外，地矿部环境地质研究所刘传正、施韬、张颖曾在前期参加了部分工作。插图清绘工作由李京森、胡素娥完成。

本书的编写得到了张咸恭、段永侯、夏其发、哈承佑等诸多教授、专家的鼓励、支持和关怀。张咸恭教授还在百忙之中为本书作序。中国水文地质工程地质勘察院黎青宁高级工程师、清华大学王恩志副教授、天水市建委杜毅高级工程师在课题的研究中给予了极大的支持和帮助，在此一并表示由衷的感谢。

滑坡预测预报是滑坡研究中的前沿课题，也是减轻滑坡灾害的关键。“黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究”是作者等在黄土滑坡研究中的一次探索和尝试，其研究结果尚需在实践中检验，研究内容亦需进一步补充、丰富、完善、深入，甚至更新和再发现。但其研究思路、研究途径和预测预报模式若能为同行参考，对同行们的类似研究起到抛砖引玉的作用，便是本书作者的初衷所在。目前，这项研究仍在继续，作者诚恳欢迎来自各方的批评、建议，并希望在今后的研究中得到同行专家、学者和减灾工作者们的关注和指正。

作 者

1996年6月于北京

目 录

序

前 言

第一章 黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究的意义与内容·····	(1)
第一节 黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究的意义·····	(1)
第二节 黄土地区滑坡的分布发育规律·····	(2)
第三节 国内外滑坡预测预报研究现状与发展趋势·····	(5)
第四节 黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究的内容与技术路线·····	(10)
第二章 天水市区黄土滑坡发育的典型性·····	(12)
第一节 天水市区黄土滑坡的成灾历史与危害现状·····	(12)
第二节 天水市区黄土滑坡发育的环境背景概况·····	(13)
第三节 天水市区黄土滑坡的分布规律·····	(19)
第四节 天水市区黄土滑坡的主要类型·····	(21)
第三章 滑坡变形破坏机理研究·····	(23)
第一节 滑坡的发育特征与变形破坏的地质模式·····	(23)
第二节 滑坡变形破坏机理的相似材料模型实验研究·····	(30)
第三节 滑坡变形破坏机理的有限元数值模拟研究·····	(36)
第四章 滑坡动态演变过程及趋势预测研究·····	(48)
第一节 滑坡动态的实际表现及趋势分析·····	(48)
第二节 相似材料模型上滑坡动态全过程的预演·····	(55)
第三节 滑坡演变的动态过程与趋势预测的数值模拟研究·····	(57)
第四节 滑坡失稳后活动强度的估测·····	(75)
第五章 滑坡灾变判据及灾变预测的数学模型研究·····	(79)
第一节 滑坡的灾变判据·····	(79)
第二节 滑坡灾变预测的数学模型研究·····	(80)
第六章 滑坡减灾对策研究·····	(84)
第一节 滑坡灾害损失预评估·····	(84)
第二节 基于天水市区典型滑坡的减灾对策研究·····	(85)
第三节 黄土地区滑坡的减灾对策研究·····	(86)
结 论·····	(88)
主要参考文献·····	(91)
英文摘要·····	(93)
滑坡照片·····	(95)

第一章 黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究的意义与内容

第一节 黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究的意义

一、社会经济意义

我国黄土面积为 63.53 万 km^2 ，约占全国陆地总面积的 6.63%。其中，由青海东部，甘肃东部、中部，宁夏南部，陕西北部、中部，山西、河南西部等地组成的黄土高原地区，黄土连续分布面积为 44 万 km^2 ，其余零星分布于新疆、东北、太行山以东及山东、江苏等地（张宗祜，1989）（图 1-1）。中国黄土分布面积广、厚度大、地层层序完整，举世闻名。尤其黄土高原地区，更以黄土沉积连续，发育厚度大，地形、地貌及岩性组构特征典型而著称于世。通常意义上讲的黄土地区即指黄土高原地区。本书亦沿用这一习惯概念。

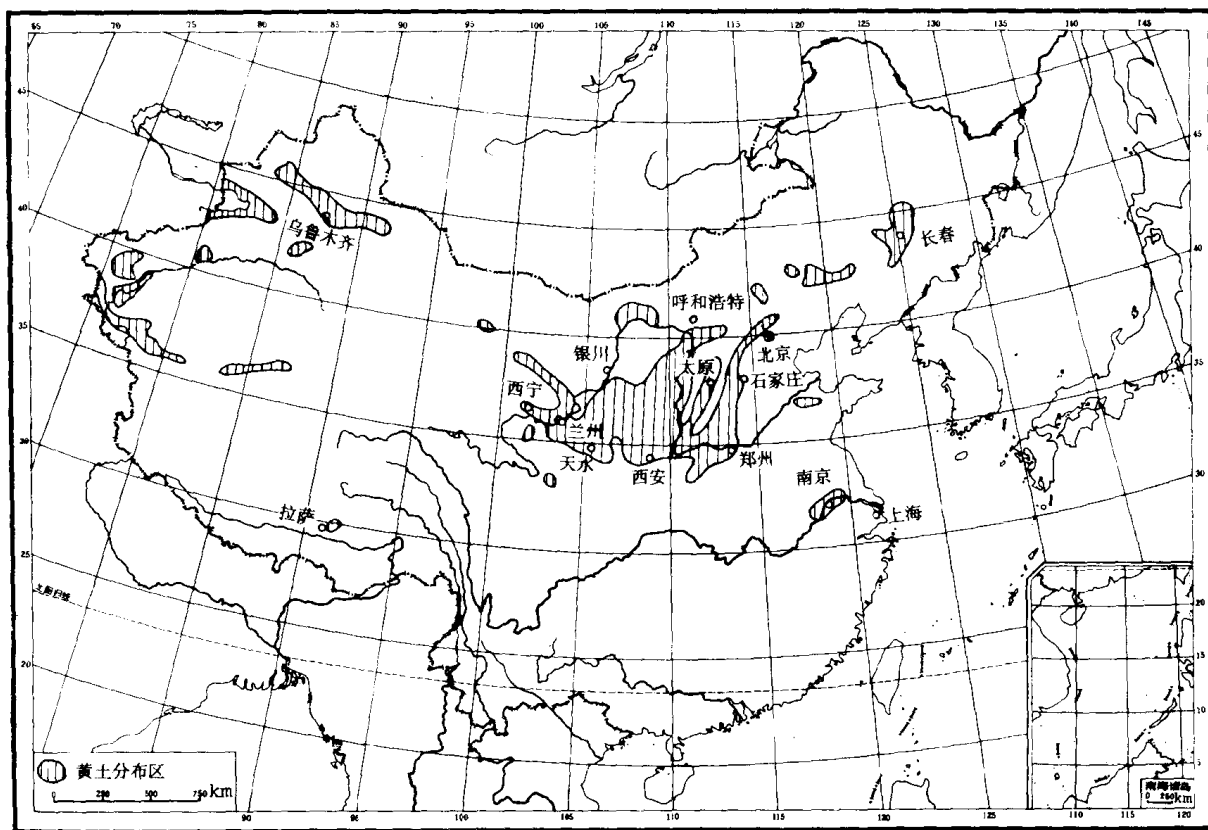


图 1-1 中国黄土分布图

（据张宗祜，1989）

黄土地区的矿产资源、水电资源、土地资源及光热资源丰富，开发潜力大，具有建立能源、重化工基地、牧业、林果业基地的优越条件。然而，由于黄土岩性疏松，大孔隙、垂直节理发育，含大量碳酸盐物质，遇水极不稳定，抗侵蚀性弱，且因黄土高原地壳长期上

升, 沟谷切割强烈, 地形破碎, 沟壑纵横, 地面坡度陡等, 因此, 黄土地区地质环境十分脆弱。黄土地区地处干旱、半干旱气候过渡区, 年内降水集中, 强度大。在这种自然地理地质环境下, 以水土流失、滑坡、崩塌、泥石流灾害为主的多种自然灾害发生频繁。近年来, 黄土地区人口快速增长, 至 1985 年, 人口已达 8149.24 万, 占全国人口 104532 万的 7.8%, 比 1980 年年均增长 16.7%, 高于全国 12.8‰ 的人口增长速度。随着人口的快速增长和工程经济建设的发展, 开挖坡脚、坡上填方、过度耕种等各种不合理人类活动剧增, 从而更加剧了自然灾害的发生频度和强度。与全国其它地区相比, 黄土地区工业发展缓慢, 农业生产水平低下, 人民生活长期处于比较贫困状态。1985 年, 全区工农业总产值为 809.04 亿元 (按 1980 年不变价格计算), 占全国同年工农业总产值的 6%, 与 1980 年相比, 平均增长 10%, 低于全国 12% 的增长速度。频发的自然灾害是阻碍黄土地区社会经济发展的主要因素之一。

滑坡是黄土地区的主要灾害之一。据统计, 全国约有 1/3 的滑坡灾害发生于黄土地区。1949—1990 年, 仅在陕、甘、青 3 省部分地区, 至少有 1025 人直接死于滑坡灾害。1955 年 8 月 18 日, 陇海线西宝段卧龙寺黄土滑坡, 毁坏路基 230m, 中断行车数日。1983 年 3 月 7 日, 甘肃东乡县洒勒山黄土滑坡, 瞬间压埋村庄 3 座, 致死 237 人, 伤 22 人, 毁房 500 余间, 死牲畜 433 头, 毁埋公路 1000m、农田 20 余公顷、水库两座。1990 年 8 月 11 日, 天水锻压机床厂黄土滑坡, 瞬时摧毁车间 6 座, 致死 7 人, 使一个正在蓬勃发展的企业陷于瘫痪。白鹿塬滑坡、蒋刘滑坡、黄茨村滑坡等许多著名大型灾害性滑坡均发生于黄土地区。因此, 以减轻滑坡灾害为目的, 开展“黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究”, 具有十分重要的社会经济意义。

二、理论意义

黄土是我国滑坡发育的易滑地层之一。黄土覆盖面广, 发育厚度大。黄土滑坡在我国, 乃至世界上都占有特殊的地位。受黄土地区地形地貌, 黄土地层岩性、构造、构造及其与下伏基岩接触特征的控制, 以及受特殊的自然地理、气候条件、人类活动方式的影响, 发生于黄土地区的各类滑坡, 与其它地区的滑坡相比, 发育、活动性质独特。如滑面多沿下伏基岩面, 或产生于下伏第三纪软弱泥岩, 或顺沿黄土古土壤层; 滑坡前部易崩塌, 滑动速度大, 多具崩滑性等。因此, 在黄土地区内, 选取典型滑坡点, 进行解剖研究, 查明滑坡的形成发育机理, 预测其动态变化趋势, 在滑坡研究中具有明显的理论意义。

第二节 黄土地区滑坡的分布发育规律

受区域地质构造、地层岩性、地形、地貌条件控制和气候、人类活动条件的影响, 黄土地区的滑坡具有明显的分布发育规律。

一、黄土地区滑坡的分布规律

黄土地区内的滑坡分布呈现其特有的时空规律性。

1. 空间分布规律

区内滑坡沿塬、梁、卯边及河谷两岸成带状分布, 围绕新生代、中生代构造盆地边缘成群集中, 在地震活动带内成片密集。此外, 明显受降雨影响, 年降雨量大于 400mm 的地区, 滑坡发育; 小于 400mm 的地区, 滑坡稀少 (图 1-2)。

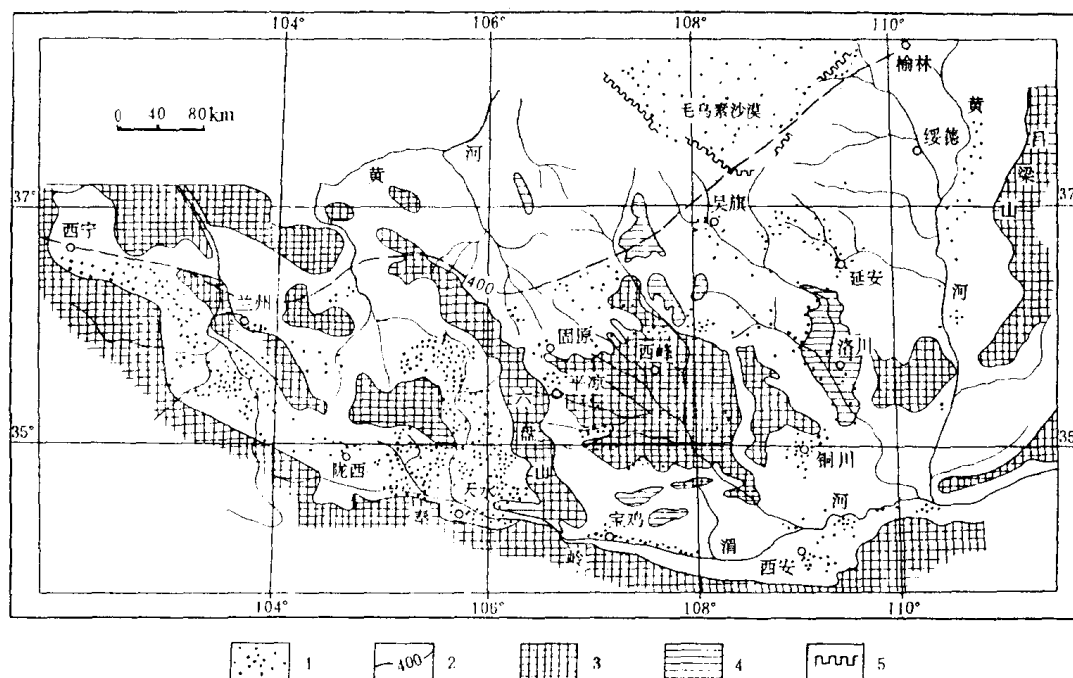


图 1-2 黄土高原滑坡分布图

(据靳泽先等, 1989)

1. 滑坡点; 2. 降水等值线; 3. 基岩山区; 4. 黄土塬; 5. 长城

因地形有利, 中生代、新生代盆地周边滑坡极其发育, 自盆地周边向中心方向, 滑坡分布由密到疏。尤其新生代红层盆地, 第三纪泥岩(粘土岩)发育, 遇水易软化, 上覆黄土与基座红层构成的特殊二元结构特别利于滑坡发育。故黄土地区的新生代红色盆地, 如湟水-临夏盆地、陇中盆地、陇东盆地、西吉盆地、关中盆地及陕北盆地等盆地, 周边滑坡高度密集。据统计, 在这些地区, 宽度大于 500m 的滑坡每 100km² 大于 10 个。

黄土塬、梁、卯及河谷两岸, 地形切割条件好, 故滑坡发育。董志塬、洛川塬、白鹿塬及其周围的梁、卯边、小塬边, 渭河、巴谢河、泾河等及其支流河谷两岸, 滑坡发育。据查, 每 100km², 宽度大于 500m 的滑坡个数超过 5 个。在这些地带内, 基座为第三纪粘土岩的地段, 滑坡发育密度更大。

在黄土高原内, 发育有三大地震带: 银川—天水—武都一线的六盘山南北地震带、兰州—天水一线的祁吕系前弧西翼北西向地震带、渭南—西安—宝鸡一线的祁吕系前弧东翼北东向地震带, 均为我国的活跃地震带。著名的 8.5 级海原地震、8 级华县地震、7.5 级通渭地震及 7.5 级天水地震等均发生于这些地震带内。受地震影响, 在地震带内滑坡密集发育。如海原地震 8 度区内, 滑坡高度密集。据查, 黄土地区 6 级以上地震便诱发出大量滑坡。

黄土地区北部, 年降水量小于 400mm, 滑坡稀少, 其它地区年降水量大于 400mm, 滑坡发育。

上述地震带交汇处, 则是滑坡密集发育带。从图 1-2 清楚可见, 凡滑坡密集区, 均为易发滑坡段的交汇区, 如天水地区、西宁—临夏一线、宝鸡渭河沿线、西安周边地区、兰州周边地区及延安周边地区等, 均为滑坡成片(带)密集发育区, 其中以天水地区滑坡分布

密度最大，滑坡集中区面积最广。

天水地区位于陇中第三纪红色盆地东缘，银川—天水—武都地震带和兰州—天水地震带交汇部位的渭河中游地段。该区新构造运动、河流下切作用强烈，地形破碎，黄土-红层二元结构地层发育，年降水量 580mm，降水集中，多暴雨。因此，滑坡异常发育（图 1-2）。该区滑坡的发育集中了黄土地区滑坡群区密集带的所有特点，滑坡分布密度、发育特征、活动形式之典型，在黄土地区首屈一指。区内规模大于 10 万 m³ 的滑坡分布密度每 100km³ 超过 20 个（据吴纬江，1992）。

2. 时间分布规律

黄土地区滑坡发育的时间性明显受降雨、地震的动态特征影响。

据粗略统计，区内约有 90% 的滑坡与降雨、地震有关。受降雨的年内动态特征影响，与降雨有关的滑坡多发生在 7、8、9 三个月的雨季期间。地震活跃期，对应着滑坡多发期。每次 6 级以上地震，均触发大量滑坡。1654 年天水 7.5 级地震、1718 年通渭 7.5 级地震及 1920 年海原 8.5 级地震等均诱发了大量滑坡。

此外，每年 3—5 月的冬春冰雪消融期亦相对多发滑坡。著名的洒勒山滑坡、洒勒山新滑坡、卧龙寺滑坡就发生于这一时期。

二、黄土地区滑坡的发育规律

区内滑坡的发育规律受制于控滑因素的发育特征。

1. 控制滑坡发育的主要因素

黄土地区特有的塬、梁、卯地貌单元周边及构造盆地地形，为滑坡发育创造了优越的地形条件；黄土地层质地松散，大孔隙、垂直节理发育，多层古土壤存在，为滑坡发育提供了良好的物质基础；黄土地层与下伏基岩幔覆式堆积接触特征，为滑面形成提供了有利条件。此外，黄土地层下广泛分布岩性软弱的第三纪泥岩地层，亦是该区滑坡发育的另一主要因素。除第三纪泥岩外，其它类型基岩，除其与黄土接触面外，很少直接参与滑坡的发育过程。

2. 黄土滑坡的主要类型

黄土地区发育多类黄土滑坡。已有的多年研究成果表明，在多类黄土滑坡中，从滑体物质、滑面发育位置、滑坡运动机制三方面看，表 1-1 中的几类黄土滑坡在区内广泛发育。

表 1-1 黄土滑坡的主要类型

分类指标	滑 坡 类 型	典 型 滑 坡
滑体物质	黄土滑坡	兰州白塔寺滑坡、天水锻压机床厂滑坡
	黄土-红层滑坡	洒勒山滑坡、兰州常湾滑坡
滑面发育位置	黄土滑坡	兰州白塔寺滑坡、天水戒烟所滑坡
	黄土-红层接触面滑坡	天水锻压机床厂滑坡、长安古刘滑坡
	黄土-红层顺层滑坡	巴谢河巴峰山滑坡、兰州大水沟滑坡
	黄土-红层切层滑坡	洒勒山滑坡、卧龙寺滑坡
	黄土-非红层接触面滑坡	天水黄龙西村滑坡、葡萄园滑坡
滑坡滑移特征	（缓慢）蠕滑性滑坡	铜川川口滑坡、天水椒树湾滑坡
	（快速）崩滑性滑坡	洒勒山滑坡、天水锻压机床厂滑坡

155黄土

从滑体物质角度看,黄土滑坡,滑体由黄土组成;黄土-红层滑坡,滑体由黄土及第三系泥岩两类物质组成。据查,区内黄土滑坡约占70%以上,黄土-红层滑坡不足30%,且后者多为规模大于1000万 m^3 的巨型滑坡。

就滑面发育位置而言,黄土滑坡的滑面发育于黄土地层中,多为规模小于10万 m^3 的小型滑坡。黄土-红层接触面滑坡指主滑面顺沿黄土与第三纪泥岩接触面发育;黄土-非红层接触面滑坡指主滑面顺沿黄土与非红层类基岩接触面发育。此二类滑坡规模多在10万 m^3 以上。黄土-红层顺层滑坡指主滑面沿红层层面发育;黄土-红层切层滑坡为主滑面斜切红层层面发育。此二类滑坡多为规模大于百万 m^3 以上的大型,甚至巨型滑坡,尤其后者中多为巨型滑坡。据粗略统计,黄土地区内各类滑坡的分布发育状况大致为:黄土滑坡占40%左右,黄土-红层接触面滑坡约为30%;黄土-非红层接触面滑坡小于5%,黄土-红层顺层滑坡为20%,黄土-红层切层滑坡小于10%。

滑坡运动机制分类,不同研究者以不同目的,提出过多种分类方案。已经发生的众多黄土滑坡的滑移特征显示,滑坡的移动主要表现为两种形式:一类滑坡移动速度缓慢,在滑移过程中自前至后逐渐解体,或缓慢地整体滑动,此类多为复活后的各种老滑坡,少数为滑面极缓的黄土滑坡或黄土-红层接触面滑坡,在此称具这类滑移特征的滑坡为(缓慢)蠕滑性滑坡。另一类滑坡在移动过程中,速度快,且既滑亦崩,以滑为主,多为前崩后滑,故称此类为(快速)崩滑性滑坡。这类滑坡在黄土地区分布极广,其滑移特征代表着多数新黄土滑坡的滑移模式。洒勒山滑坡、蒋刘滑坡及天水锻压机床厂滑坡等均属于此。由于此类滑坡滑移速度快,且呈崩滑性,所以成灾性极大。在黄土地区,几乎所有的造成人员伤亡、重大财产损失的灾害性滑坡都为崩滑性滑坡。因而,从灾害角度看,研究这类滑坡意义最大。

基于上述认识,本书以具崩滑性滑移特征的黄土-红层接触面滑坡(以后称崩滑性黄土-红层接触面滑坡)为对象,研究其形成活动机理,预测其动态演化趋势,继而提出相应的减灾对策建议。

第三节 国内外滑坡预测预报研究现状与发展趋势

对于具体滑坡而言,滑坡预测预报有滑坡滑动时间预报、滑坡活动强度预报及滑坡危害预测。滑坡预测预报研究在国内外由来已久,近十多年来十分活跃。

一、滑坡滑动时间预测预报研究的现状与趋势

滑坡滑动时间的预测预报是世界公认的尖端课题。由于滑坡地质过程、形成条件、诱发因素的复杂性、多样性及其变化的随机性、非稳定性,从而导致滑坡动态信息极难捕捉,加之滑坡动态监测技术的不成熟和滑坡研究理论的不完善,滑坡滑动时间的预测预报一直被认为是一项十分困难的前沿课题。此外,滑坡监测费用高、周期长,也是制约滑坡滑动时间预测预报进展的因素之一。尽管如此,近几十年来,国内外许多研究者都将其作为攻克目标,潜心研究,取得了初步的成果。

1. 研究现状

滑坡形成与变形过程是滑坡岩土体蠕动变形的过程。因此,数十年来,在粘弹塑性力

学基础上发展起来的、揭示岩土体变形时间效应的岩土体蠕变变形(流变)理论一直是滑坡滑动时间预测预报研究的基础。岩土体蠕变(流变)理论中的应变(位移)-时间曲线的三阶段过程被视为是滑坡预测预报的基本标准(图 1-3)。第Ⅰ蠕变阶段,又称减速蠕变阶段(AB段),岩土体变形以减速发展,蠕变曲线斜率逐渐减小。第Ⅱ蠕变阶段(BC),又称稳定蠕变阶段,岩土体变形大致以等速发展,蠕变曲线近似一倾斜直线,应变速率大体不变。第Ⅲ蠕变阶段(CE),又称为加速蠕变阶段,岩土体变形速率由C点开始迅速增加,到达E点,岩土体破坏。其中,在CD段,变形迅速增大,但岩土体尚未破坏,DE段,岩土体变形速率剧增,岩土体很快破坏。据此,滑坡的变形破坏过程亦被分为与之对应的几个阶段,并把对各阶段起始时刻的预报相应归之为长期预报,中期预报,短期预报和临滑预报。所有的滑坡滑动时间预测预报都围绕滑坡变形破坏阶段,以不同时间尺度进行预报。日本学者斋藤迪孝在室内实验和仪器监测的基础上,于1965年提出以第Ⅱ蠕变阶段或第Ⅲ蠕变阶段的应变速率为基本参数的预测预报经验公式(1-1)、(1-2)及相应的预测预报理论,当属国内外系统研究滑坡预测预报理论之始端。尤其是用此理论成功地预报了1970年1月22日发生的日本饭山线高场山滑坡后,引起了各国研究者的兴趣。滑坡预测预报研究渐趋活跃。特别是对一些大型滑坡的成功预报,更增加了研究者的信心。如智利研究者对Chuiquicamata露天矿滑坡(1969.2.18),加拿大研究者对Hogarth滑坡(1975.6.23),我国研究者对金川露天矿采石场滑坡(1983.7.9)、宝鸡卧龙寺新滑坡(1977.5.5)及湖北新滩滑坡(1985.6.12)等的成功预报。

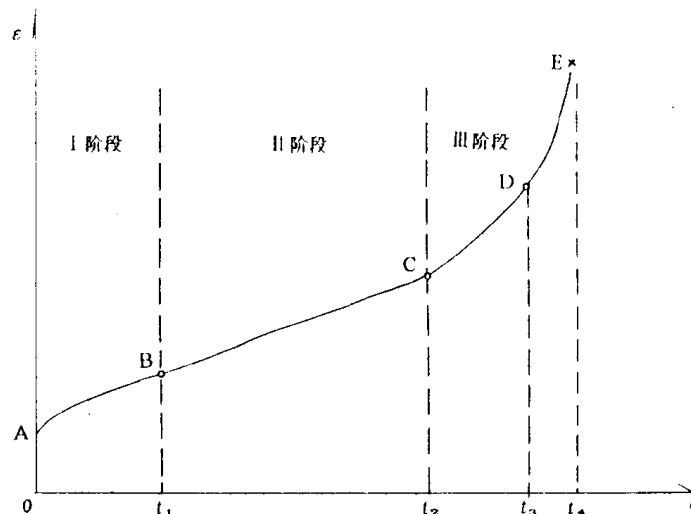


图 1-3 岩土体蠕变曲线

$$\lg t_r = 2.33 - 0.916 \times \lg \dot{\epsilon} \pm 0.59 \quad (\text{第 II 阶段}) \quad (1-1)$$

$$t_r - t_1 = \frac{\frac{1}{2} (t_2 - t_1)}{(t_2 - t_1) - \frac{1}{2} (t_3 - t_1)} \quad (\text{第 III 阶段}) \quad (1-2)$$

上二式中: t_r 为达到最终破坏(滑动)所经历的时间; $\dot{\epsilon}$ 蠕变速率 ($10^{-4}/\text{min}$); t_1 、 t_2 、 t_3 为位移时间曲线上任意的相对位移量相等的相邻三点所对应的时间。

从预测预报方法上看,目前国内外研究主要集中于以下几方面。

(1) 滑坡变形前兆的现象预报法

与地震、火山等其它自然灾害相似,滑坡失稳前也表现出多种宏观先兆:前缘频繁崩塌,地下水位突然变化,地热、地声异常,动物表现失常等。由于这些现象在临滑前表现直观,所以用于临滑预报十分有效。但这种方法的有效性依赖于正确的地质分析和经验判

断。用这种方法,我国曾成功地预报了宝成线须家河滑坡(1963.9.13)。

(2) 位移-时间曲线变化趋势判断法

基于岩土体变形的蠕变(流变)理论,在滑坡变形的不同阶段,位移-时间曲线形态不同,临滑阶段的位移-时间曲线呈现急剧上升趋势。在系统监测资料的基础上,判断位移变化的加速阶段,按变化趋势在曲线上找出滑坡失稳时刻,作出预报。这是近几十年来,滑坡滑动时间预测预报中最常用的方法。预报效果和精度取决于系统的位移监测和监测的时间尺度,并依赖于正确的地质分析和经验判断。智利 Chuquikamata 滑坡、加拿大 Hogarth 滑坡、我国的卧龙寺新滑坡(1977.5.5)及新滩滑坡(1985.6.12)等都是用此方法作出了成功的预报。其特点亦是对临滑预报较为有效。

(3) 斋滕法和改进的斋滕法

由于斋滕法以土体蠕变理论为基础,以应变速率为基本参数,所以在一定程度上反映了滑坡变形的本质。因而,自“斋滕法”出现后,较多研究者用其进行滑坡预报,取得了一定的效果。另一方面,“斋滕法”只适用于前缘不受阻的土质滑坡,所以在应用上有一定的局限性。一些学者(秦四清等,1993)尝试研究了改进的“斋滕法”,用来预报滑坡滑动时间。

(4) 统计数学模型法

近年来,随着各种统计数理理论在地学中的广泛应用,许多研究者尝试以位移为参数,以统计数理理论为基础,建立滑坡位移-时间关系的数学模型,以期用数学模型描述滑坡变形的规律,预报滑坡发生时间。这是目前滑坡预测预报研究中最活跃之处,在我国尤为活跃。目前,最常见的统计数学模型有回归模型(晏同珍,1988)、灰色理论模型(陈明东,1988)、泊松旋回模型(晏同珍,1987)、生物生长模型(晏同珍,1988)、梯度正弦模型(崔政权,1989)及突变理论模型(秦四清,1993)。所有的模型预报法都只用于临滑预报,并都是对已发生的滑坡作反演拟合预报,事后验证效果良好。但无一用于未发生滑坡的超前预报,故各种模型的真实效果如何,尚有待实践检验。

(5) 黄金分割法

黄润秋教授、张倬元教授等人以自然界事物演变的普遍规律——“黄金分割律”为依据,通过对国内外十余个具有完整系统状态历时曲线的滑坡实例的分析研究,于1988年提出以“黄金分割法”预测滑坡发生时间,指出,滑坡位移历时曲线的线性段的历时与线性、非线性段历时之和之比等于黄金分割数0.618,就其反演拟合结果看,效果较好。尤其对滑坡中、短期预报可靠性较高。

(6) 非线性动力学模型预报法

1993年,秦四清博士以非线性动力学理论为基础,提出滑坡孕育过程的非线性动力学模型,进而预报滑坡发生时间。非线性动力学观点和方法将滑坡发生时间的预报研究从目前的经验预报和统计预报引入物理预报,从理论上讲,这是认识上的一个飞跃。但是,由于滑坡演变的复杂性及外界环境的多变性,要建立滑坡孕育过程的非线性动力学方程决非易事。但无论如何,这种观念上的更新,对今后进一步的研究将产生很大的影响。

(7) 降雨量参数预报法

降雨在滑坡演变过程中起着重要的诱发作用。雨季或雨季后,滑坡发生频繁。降雨对滑坡的诱发作用与累计雨量和雨强有关。一定的雨量和雨强可缩短滑坡的演变历程,使尚

在演变之中的滑坡提前滑动。因此,以降雨量为参数,预报滑坡起动的临界降雨量和降雨强度,亦是滑坡发生时间预报的内容之一。薛果夫于1988年对新滩滑坡变形演变与降雨量的关系及其对降雨的敏感度等进行了深入的反演分析研究,其反演拟合结果较好。日本学者通过在滑坡模型上的降雨模拟实验,对以降雨量为参数的滑坡预报研究了多年,但至今公开的结果不多。

(8) 声发射参数预报法

以滑坡变形过程中岩土体声发射参数为指标预测滑坡动态,是目前国内外滑坡滑动时间预报研究中的另一热点。于济民等人通过对宝成线观音山车站山体变形的声发射监测,提出了山体变形趋势预测。结果表明,这种方法用于滑坡预报是可行的。

(9) 多参数预报法

选取多种参数,综合预测滑坡发生时间,也是国内外滑坡滑动时间研究中的热点之一。美国学者 B. Voight 于 1989 年提出多参数预报的经验公式:

$$t_t - t_x = (\Omega_x^{-\alpha} - \Omega_t^{-\alpha}) / A (\alpha - 1)$$

式中: Ω 为任意参数,位移、剪应力、地面倾角等; Ω_x 为初始值; Ω_t 为预报值; α 、 A 为经验常数。

由于经验常数 A 、 α 不易确定,所以上式在应用上还有较大限制。

从上述讨论可以看出,近几十年来,国内外滑坡滑动时间预测预报研究颇为活跃,成果甚多。但纵观近几十年的研究,自1965年“斋藤法”后,研究进展较为缓慢。从方法有效性上看,仅前(1)、(2)、(3)种方法对滑坡做出过成功的滑前预报。(4)、(5)、(6)三种方法均为事后验证,所以真正效果如何,尚难以定论。其它几种方法正在探索之中。由此可见,以地质分析、经验判断为主的滑坡发生时间的定性或半定量、准定量预报及基于监测资料的趋势定量预报,在当前研究中占主导地位。就各国研究状况而言,或许由于中、日两国滑坡灾害较重,所以这种方法研究开展较多。欧美国家则相对较少,多侧重于滑坡发生空间的区域性预测预报研究;即使对滑坡动态系统监测,也只是侧重于回答滑坡是否稳定和滑坡防治措施的效果如何这两个问题。这可能与欧美国家注重滑坡防治有关。

2. 滑坡滑动时间预测预报研究的趋势

尽管国内外滑坡滑动时间预测预报研究已有数十年历史,取得了较大进展。但至今尚有许多关键问题没有解决,滑坡滑动时间预测预报理论和方法还不成熟。根据已有研究中存在的问题,可以预测在今后一段时间内滑坡滑动时间预测预报研究将集中于以下几方面:

(1) 基于岩土体蠕变(流变)理论的滑坡变形演变过程及动态趋势预测预报研究

无论学科如何发展,依据于粘弹塑性力学的岩土体蠕变(流变)理论是滑坡滑动时间预报的基础。根据岩土体蠕变理论,滑坡的变形破坏是其内部应力和岩土体强度随时间不断变化的结果,位移、应变及其它是这种变化的直接和间接反映。因此,岩土体蠕变理论揭示了滑坡变形破坏的本质,描述了滑坡应力、强度、应变位移随时间变化的内在规律。因而,以岩土体蠕变理论为基础,研究滑坡变形过程中应力、强度、应变、位移、应变(位移)速率等随时间的变化规律,进而预测滑坡滑动时间,应是滑坡滑动时间预测预报研究的突破口之一。

(2) 多因子综合预测预报研究

滑坡形成过程中,滑体在宏观和微观上有多种表现,如应力、应变、位移、应变速率、

岩土体强度、弹性波波速、电阻率、声发射参数等。所有这些参数虽都可作为滑坡预报的因子，但如何选取能够反映滑坡动态过程的最佳因子，是滑坡预报的关键。

(3) 基于一定数理统计理论的滑坡滑动时间预测预报模型研究

尽管已有多种数学模型用于滑坡滑动时间预报，但尚无一成熟模型。所有模型均需要在实践中改进、完善。

(4) 基于非线性动力学的滑坡滑动时间预测预报研究

非线性动力学思想的提出，无疑会在今后的研究中掀起热潮。

(5) 水在滑坡演变过程中的作用和定量评价研究

水（地表水、地下水）在滑坡变形破坏过程中作用极大，然而其在滑坡变形破坏中的作用机理及其定量表现，一直是滑坡预报研究中的难点。在今后研究中，它仍将是重点课题之一。

(6) 人类活动在滑坡演变过程中的作用和定量评价研究

随着人类活动的广泛和加强，因不合理的人类活动诱发的滑坡愈来愈多，所以人类活动在滑坡演变过程中的作用机理及其定量表现，亦将是滑坡滑动时间预报研究的重要方向之一。

(7) 滑坡变形破坏过程中岩土体强度的变化规律研究

随滑坡变形的发展，滑坡岩土体强度不断变化。但各类岩土体强度的变化规律如何，尚不完全清楚，故仍需进一步研究。

二、滑坡活动强度预测预报研究现状与趋势

滑坡活动强度包括滑动速度和滑移距离两方面。滑坡活动强度预测是滑坡运动特征的预测。因而研究物体运动特征的运动物理学和能量转换与守恒定律被视为是滑坡运动学研究的基础。近几十年来，国内外对滑坡运动特征的预测预报研究，主要集中于以下几方面。

1. 质点运动学预测方法

将滑坡运动看作是质量集中于重心的质点运动，从而利用质点运动学和相应的能量转换与守恒定律研究滑坡的运动过程。我国潘家铮、美国土木工程学会等据此分别提出过滑速预测公式。经多年实践检验，这种方法在滑坡运动特征预测中具有一定的普遍性。但已有研究中对滑动边界的假设过于简单，所以如何确定更合理的滑动边界，是今后研究的重点。

2. 滑坡运动机理研究与质量运动学相结合的预测方法

基于不同的滑坡运动机理假设，国内外已有多种预测方法。具有代表性的方法有：

(1) 奥地利学者 A. E. Scheidegger 在调查了世界上 33 个大型滑坡的运动特征后，提出架空坡斜率 f_c ，又称等价摩擦系数的概念，并发现：

$$\lg f_c = a \lg V + b$$

式中： V 为体积； $a = -0.15666$ ， $b = 0.62219$ 。据 V 求出 f_c 后，按下式计算滑速：

$$V_s = \sqrt{2g(H - f_c L)}$$

此公式为反推公式，在实际应用上有一定局限性。

(2) H. J. Körnei 则将大型滑坡视为流体，提出按流体力学方法计算滑速，在一定假设基础上，提出滑速：

$$V^2 = \frac{1}{e^{2s/k}} [V_k^2 (e^{2s/k} - 1) + V_0^2]$$

式中: $k = \frac{D_F \cdot \zeta}{g}$; $V_k = \sqrt{D_F \cdot \zeta (\sin \alpha - f \cos \alpha)}$; V_0 为初速度; D_F 为流体密度; ζ 为流体紊流系数。

上式的某些参数难于确定, 故应用上还不成熟。

(3) 日本学者佐佐木恭二在室内环剪实验的基础上, 利用测定的表观摩擦角对日本数个碎屑流滑坡的滑速、滑程进行反演拟合研究, 并提出了相应的公式。

(4) 王思敬教授、王效宁博士, 在对我国数个大型滑坡运动机理研究基础上, 通过滑坡运动全过程能量分析, 提出滑速及最大滑距预测公式:

$$V = \sqrt{\frac{2}{M} U + 2g (H - Lf)}, L_{\max} = \frac{1}{gf} \cdot \frac{U}{M} + \frac{H}{f}$$

式中: M 为滑体质量; U 为滑体变形能; H 为重心落差; L 为水平滑距; f 为动摩擦系数。其反演结果与实际接近。但实际上, 在滑体变形能量计算中, 假设太多, 故此类研究仍不成熟。

纵观已有研究成果可见, 与滑坡滑动时间的预测预报研究一样, 滑坡活动强度的预测预报研究亦不够成熟, 有待进一步研究。如何将质点运动物理学理论和能量转换与守恒定律更合理地用于滑坡运动特征研究, 是今后的主要研究趋势。

三、滑坡危害预测预报研究现状与趋势

对滑坡从单纯的地质现象研究到从地质灾害角度研究是近几十年来滑坡研究观念上的一个飞跃。尤其“减灾十年”活动的开展, 进一步推动了这方面的研究。目前对具体滑坡危害的预测研究多是在运动特征研究的基础上, 找出滑坡可能的危害范围, 根据直观经验判断对可能受灾范围内的灾害损失和社会经济影响作出评估。如何作出更准确的、定量的滑坡危害预测是今后这方面研究的主要趋势。

第四节 黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究的内容与技术路线

一、黄土地区滑坡研究的基础及存在的问题

自1958年8月陇海线西宝段卧龙寺滑坡发生后, 黄土地区的滑坡研究受到了政府及生产、教学、科研部门的广泛重视。近几十年来, 许多生产、科研及教学单位对黄土地区各类滑坡进行了大量的调查、研究, 如“渭河干流黄土塬边渠道边坡稳定性研究”, 从而对黄土地区各类滑坡形成机理、分布、发育特征有了初步的认识。1983年3月7日洒勒山滑坡的发生, 将黄土地区的滑坡研究推上了一个新的高潮阶段。通过“洒勒山滑坡形成机制及巴谢河流域滑坡研究”, “西南、西北山地崩、滑灾害研究”, “黄河中游不稳定斜坡破坏机制研究”, “黄河中游区域工程地质研究”, “黄土高原地区综合治理开发考察系列研究”等多项国家和部门“六五”、“七五”重点科研项目的开展, 对黄土滑坡的形成机理有了更进