

前 言

黄土滑坡灾害是黄土地区常见的表生地质灾害现象，黄土地区经济的迅猛发展，又使这种灾害的发育和危害日益严重，严重地制约着黄土地区的经济发展，限制着黄土地区落后面貌的改变。因此，黄土滑坡灾害的理论研究、实践探索均受到了空前重视，在众多专家、学者、工程技术人员的辛勤耕耘下，在黄土滑坡灾害的类型、成因、机理、预测预报、防治措施等方面都提出了一系列理论和方法，并得到了推广应用。尽管这些理论和方法尚有不足之处，但也取得了一些成功经验。遗憾的是，黄土滑坡灾害研究体系尚不完善，至今尚无一本全面论述黄土滑坡灾害的专著面世。

为此，作者在大量阅读前人资料及长期黄土滑坡研究、实践的基础上，结合博士学位论文《黄土滑坡发育规律及其防治措施研究》及甘肃省自然科学基金项目“黄土滑坡中短期预报的理论与实践”，整理、删改、提炼，完成本书。全书共 8 章，第 1 章绪论，概述了黄土滑坡灾害的危害及其研究意义；第 2 章黄土地区区域环境地质条件，评述了我国黄土地区的区域特征和黄土特性，包括黄土的基本性质、成因、时代、地层序列和结构、分布、地质特征等；第 3 章黄土滑坡形成条件、分布及特征，较全面地论述了黄土滑坡的形成条件，时、空分布及其平、剖面特征和运动特征；第 4 章黄土滑坡滑带土研究，详述了黄土滑坡滑带土的类型及各类滑带土的微结构特征和变形机理；第 5 章黄土滑坡形成机理研究，在分析黄土斜坡应力分布、变化的基础上，论述了灌溉型、暴雨型、工程型和地震型黄土滑坡的形成机理；第 6 章黄土滑坡运动机理研究，阐明了黄土滑坡的运动特征和堆积特征，并利用 FLAC 软件和离散元程序模拟了黄土滑坡的变形、运动过程；第 7 章黄土滑坡时空预报研究，介绍了已有滑坡的时空预报方法，提出了针对黄土滑坡的时空预报方法，并以实例验证；第 8 章黄土滑坡防治措施分析，在阐明黄土滑坡防治目的、意义及原则、方法的基础上，进行了黄土滑坡防治措施分析，介绍了一些成功防治的实例，最后提出了滑坡防治工程经济效益评估模式。

本书在撰写过程中得到了导师、著名工程地质学家张倬元先生的悉心指导，受到了著名滑坡专家徐邦栋先生、王恭先先生的点拨，得到了西北大学王家鼎教授、成都理工大学

黄润秋校长、聂德新教授、刘汉超教授和李攀峰博士、刘惠军博士、宋彦辉博士、刘宏博士等以及甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所冯学才、曾思伟、靳泽先、王志荣、张世武等高级工程师，王靖泰、王得楷、王序铨、李永进、吴玮江等研究员以及孟兴民博士、郎煜华博士等许多同事的支持和帮助，并引用了他们的部分成果和资料，在此表示衷心感谢。

本书是作者长期科研、实践经验的总结，理论与实践并重，是较全面反映黄土滑坡灾害研究的一次尝试，为今后本领域的研究与发展提供了一定的基础。但限于作者的理论水平和实践经验，难免有错误不当之处，希同行专家批评指正。

王念秦

二零零四年八月于兰州

图书在版编目(CIP)数据
黄土滑坡灾害研究/王念秦,张倬元著.—兰州:兰州大学出版社,2005.3
ISBN 7-311-02552-4

I.黄... II.①王...②张... III.黄土高原—滑坡—灾害—研究 IV.P642.22

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第027175号

黄土滑坡灾害研究

王念秦 张倬元 著

兰州大学出版社出版发行

兰州市天水南路222号 电话 8912613 邮编 730000

E-mail press@onbook.com.cn

<http://www.onbook.com.cn>

兰州大学出版社激光照排中心照排

兰州德辉印刷有限责任公司印刷

开本:787×1092 1/16 印张:15.75

2005年3月第1版 2005年3月第1次印刷

字数:361千字 印数:1~1000册

ISBN7-311-02552-4/P·26 定价:32.00元

本书如存在漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与兰州大学出版社营销中心联系调换。
联系电话:(0931)8914298

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 黄土滑坡的危害及其研究意义	1
1.1.1 黄土滑坡的危害	1
1.1.2 黄土滑坡的研究意义	6
1.2 黄土滑坡研究的国内外动态及评述	7
1.2.1 关于黄土滑坡机理的研究	7
1.2.2 关于黄土滑坡滑带土的研究	8
1.2.3 关于黄土滑坡防治措施的研究	9
1.3 黄土滑坡灾害研究的内容、方法和技术路线	10
1.3.1 研究内容.....	10
1.3.2 研究方法.....	10
1.3.3 技术路线.....	11
第 2 章 黄土地区的环境地质条件	15
2.1 区域环境地质条件.....	17
2.1.1 黄土地层划分及分区.....	17
2.1.2 黄土地区的地质构造.....	19
2.1.3 黄土地区的地貌特征.....	21
2.1.4 黄土地区的气候特征.....	25
2.1.5 黄土地区的植被.....	28
2.1.6 黄土地区的水文情况.....	29
2.2 黄土特性分析.....	31
2.2.1 黄土的物质组成.....	31
2.2.2 黄土的微结构特征.....	34
2.2.3 黄土的物理、水理特性	37
2.2.4 黄土的力学特性.....	41
第 3 章 黄土滑坡的形成条件、分布及特征.....	47
3.1 黄土滑坡的形成条件.....	47
3.1.1 黄土滑坡形成的内在因素.....	47
3.1.2 产生滑坡的诱发因素.....	49

3.2	黄土滑坡的分布.....	52
3.2.1	空间分布.....	53
3.2.2	时间分布.....	58
3.3	黄土滑坡的特征.....	60
3.3.1	黄土滑坡的类型.....	60
3.3.2	黄土滑坡的形貌特征.....	61
3.3.3	黄土滑坡纵断面特征.....	65
3.3.4	黄土滑坡的变形特征及运动特征.....	69
第4章	黄土滑坡滑带土研究	77
4.1	黄土滑坡滑带土的一般特征.....	78
4.1.1	黄土滑坡滑带土的常见类型.....	78
4.1.2	黄土滑坡滑带(面)的宏观特征.....	79
4.1.3	滑带(面)土体物理、力学特征	80
4.1.4	典型黄土滑坡滑带特征剖析.....	82
4.2	滑带土微观结构研究.....	85
4.2.1	滑坡滑动前滑带(面)土的微观结构特征.....	85
4.2.2	滑坡滑动后滑带(面)土的微观结构特征.....	87
4.2.3	滑带土变形的微观分析.....	88
4.3	滑带土变形力学机理研究.....	94
4.3.1	滑带土变形因素分析.....	94
4.3.2	滑带土变形破坏规律.....	96
4.3.3	滑带土变形的力学机理分析.....	98
第5章	黄土滑坡形成机理研究.....	102
5.1	滑坡应力场	102
5.1.1	滑动前斜坡的应力分布	102
5.1.2	滑坡的应力状态	103
5.2	黄土滑坡变形过程分析	106
5.2.1	黄土斜坡的原始应力状态	106
5.2.2	黄土斜坡的渐进破坏过程	107
5.3	灌溉型黄土滑坡形成机理	108
5.3.1	饱和黄土蠕动液化机理	109
5.3.2	季节性冻融作用机理	112
5.4	暴雨型黄土滑坡形成机理	122
5.4.1	暴雨作用分析	122
5.4.2	暴雨诱发滑坡的作用机理	126

5.5	工程型黄土滑坡形成机理	127
5.5.1	概述	127
5.5.2	黄土斜(边)坡稳定性调查	128
5.5.3	工程活动对黄土斜坡的作用	128
5.5.4	工程型黄土滑坡的形成机理	130
5.6	地震型黄土滑坡形成机理	130
5.6.1	地震力对黄土斜坡的作用	131
5.6.2	地震型黄土滑坡的形成过程	131
5.6.3	地震型黄土滑坡形成机理	131
第 6 章	黄土滑坡运动机理研究.....	134
6.1	黄土滑坡运动特征	134
6.1.1	黄土滑坡的运动方式	134
6.1.2	黄土滑坡运动的方向和轨迹	135
6.1.3	黄土滑坡的运动速度	138
6.2	黄土滑坡的堆积特征	144
6.2.1	黄土滑坡的堆积形式	144
6.2.2	黄土滑坡的堆积范围	145
6.3	黄土滑坡运动过程模拟	145
6.3.1	滑坡灾害过程模拟的理论和方法	145
6.3.2	兰州白塔山滑坡的 FLAC 模拟	152
6.3.3	翟所滑坡运动过程离散元模拟	157
第 7 章	黄土滑坡预报研究.....	161
7.1	时间预报研究	161
7.1.1	滑坡时间预报概述	162
7.1.2	时间预报参数分析及选取	164
7.1.3	时间预报参数标准	169
7.1.4	时间预报方法研究	170
7.2	空间预测研究	182
7.2.1	空间预测研究概述	182
7.2.2	滑坡空间预测参数分析	187
7.2.3	典型黄土滑坡滑距预测方法探讨	188
第 8 章	黄土滑坡防治措施分析.....	192
8.1	滑坡防治的目的、意义.....	192
8.2	滑坡防治的原则、方法.....	192
8.2.1	滑坡防治原则	192

8.2.2	滑坡防治方法	194
8.3	防治措施分析	195
8.3.1	预防措施	195
8.3.2	治理措施	196
8.3.3	黄土滑坡的防治措施	199
8.4	黄土滑坡防治实例	204
8.4.1	灌溉型黄土滑坡防治措施	204
8.4.2	工程型黄土滑坡防治措施	207
8.4.3	城镇型黄土滑坡防治措施	211
8.5	滑坡防治工程效益评估模式研究	218
8.5.1	滑坡可能造成损失的费用估算	218
8.5.2	评估模式设计与建立	221
8.5.3	实例分析	222
附录一	黄土滑坡地面位移监测曲线.....	225
附录二	典型黄土滑坡特征照片.....	228
参考文献	235

第 1 章 绪论

1.1 黄土滑坡的危害及其研究意义

黄土是第四纪以来形成的、多孔隙弱胶结的特殊沉积物，它广泛分布于亚洲、欧洲、北美和南美等地，涉及中国、前苏联、法国、德国、波兰、匈牙利、罗马尼亚、墨西哥和美国等许多国家。在我国，它广泛不整合于不同的阶地砾卵石层、第三系、白垩系等古老地层的风化剥蚀面上，形成典型的黄土地貌景观。主要分布于黄河中、上游的甘肃、陕西、宁夏、山西、河南和青海等省（区），河北、山东、辽宁、黑龙江、内蒙古和新疆等省（区）也有零星分布，总面积约 $6.3 \times 10^5 \text{km}^2$ ，约占我国陆地面积的 6.6%，占世界黄土覆盖面积的 4.9%，特别是我国西北地区，黄土地层全、类型多、分布广、厚度大。兰州地区（西津村）黄土厚达四百余米^[1]，是世界上黄土厚度最大的地区。

由于黄土本身的特性，如，湿陷性、大孔隙、力学强度较低等，黄土地区的环境地质灾害，如水土流失、地基沉陷、崩塌、坍塌、滑坡等，时常发生，严重制约着黄土地区的经济发展。

黄土滑坡更是因其具有频发性、广布性、复杂性、灾难性而危及人民生命财产和水、电、交通等工农业设施安全，成为黄土地区一种典型的、至今仍不能根治的灾害现象。据不完全统计，我国仅陕西省就已经发生黄土滑坡 1131 处^[2,3,4]，兰州地区 1300 余处，甘肃省东部 4576 处^[5]，且这一数字还将随着西部开发、社会经济的高速发展及自然环境的不断恶化而继续增加。

1.1.1 黄土滑坡的危害

黄土滑坡是黄土地区常见的地质灾害之一，它产生于特定环境，并具有其自身的发生、发展、演化乃至消亡的动态过程和规律。作为一种地质灾害，它与地震、泥石流、洪水等自然灾害一样，可中断交通，堵塞江河，压埋村庄、农田，摧毁厂矿等，给国家和人民生命财产安全、经济建设带来重大损失。

表 1.1 列出了 20 世纪 80 年代以来，因各种原因造成的四十余处黄土滑坡的基本资料，显示了黄土滑坡发生频繁、规模差异及危害的严重性。分析认为，黄土滑坡的危害性，或称危害程度、危害范围，常由滑坡规模、滑坡所处位置、滑坡滑速等因素决定。其危害对象涉及工业、农业、交通、水利、通讯、城建等各个方面，下面从三个方面作简要论述。

1.1.1.1 对工农业设施的危害

滑坡对工农业设施的危害程度，与工农业的发展水平、工农业设施所处位置与滑坡的

表 1.1 典型黄土滑坡统计表^[6]

序号	滑坡名称	发生地点	类型	规模 ($\times 10^4 \text{m}^3$)	发生时间	危害情况
1	洒勒山滑坡	甘肃东乡洒勒山	混合型	3100	1983.3.7	压埋四个村庄，摧毁 3300 亩农田，致死 227 人。
2	古刘滑坡	陕西西安长安县白鹿塬西南坡湾河右岸古刘村	黄土型	310	1984.12.15	预报成功，无人员伤亡，摧毁 82 间民房。
3	黄茨滑坡	甘肃永靖县盐锅峡	混合型	600	1995.1.30	预报成功，无人员伤亡。
4	卧龙寺滑坡	陕西宝鸡卧龙寺	混合型	3350	1955.8.18	把陇海铁路向南推移 110m，毁两个村庄，致死牲畜数十头。
5	卧龙寺新滑坡	陕西宝鸡卧龙寺	混合型	100	1971.5.5	砸坏已成渠道，400m 外民房遭破坏。
6	黄龙西村滑坡	甘肃天水	混合型	39	1963.9.27	中断陇海铁路运输。
7	海石湾滑坡	甘、青交界大通河东岸，海石湾车站西北方向 2.75km 处	混合型	4.5	1990.8.20	中断甘青公路运输。
8	王家坡滑坡	陕西蓝田	黄土型	—	未滑	
9	五一山新村滑坡	兰州大沙坪甘肃驼铃客车厂西侧	黄土型	60	1992.3.22	
10	新型墙体材料厂滑坡	西安东郊灞陵乡老洞庙	黄土型	15	1990.4.11	摧毁一砖瓦厂。
11	红旗水库滑坡	白鹿塬荆峪沟下游	黄土型	约 200	1980.7.4	
12	天水锻压机床厂滑坡	甘肃天水北道	黄土型	200	1990.8.11	摧毁六个车间，7 人死亡，4 人受伤。
13	椒树湾滑坡	天水秦城区	黄土型	50	施工整治，未滑	危及 1000 余户居民安全。
14	黄龙西村，葡萄园车站东 K1358+150~350 滑坡	甘肃天水	黄土型	40	1963.9.17	中断行车十余天。
15	同上 K1357+700~950 滑坡	甘肃天水	黄土型	60	1981.11.29	摧毁铁路明洞 75m 和三户民房，使渭河断流 12 分钟。
16	长湾滑坡	兰州市郊金沟乡	混合型	2000	1979.11.7	破坏两个村庄。
17	滩坪沟滑坡	兰州市郊西 5km	黄土型	300	1986.6.25	

续表 1.1 典型黄土滑坡统计表

序号	滑坡名称	发生地点	类型	规模 ($\times 10^4 \text{m}^3$)	发生时间	危害情况
18	蒋刘滑坡	陕西泾阳县	黄土型	100	1984.12.2	压埋 159 间民房, 死 20 人。
19	海石湾矿井滑坡	甘肃兰州海石湾北 3km, 矿井上工业场地	黄土型	3000	1985.8.12	危及主井、副井、风井安全。
20	园沮子滑坡	兰州七里河区研镇	黄土型	—	正在变形中	
21	大水沟滑坡	兰州七里河区研镇	黄土型	150~300	1984.9.13	
22	铜川铝厂滑坡	陕西省铜川市	混合型	240~285 360 15~25	1982 开始变形	危及铝厂车间安全。
23	横山滑坡	陕西韩城电厂	混合型	500	变形中	破坏厂区设施, 危及生产安全。
24	川口滑坡	陕西省铜川市	黄土型	72	1976 年复活, 1985 年变形加剧	滑体上变电站和住宅楼遭到破坏, 429 间居民房搬迁, 死亡 4 人, 伤 15 人, 直接经济损失 1000 万元以上。
25	自强沟滑坡	兰州市伏龙坪	黄土型	0.06	1997.2.23	压埋 7 间民房, 伤 5 人。
26	水管所滑坡	甘肃永靖县盐锅峡	混合型	55	1991.6.1	破坏灌区输水管道。
27	葡萄园 1 号滑坡	甘肃天水陇海线	黄土型	30	1985.9.15	破坏铁路、中断行车。
28	翟所滑坡	国道 312 线会宁县	黄土型	20	1996.7.15	破坏 500m 国道公路, 并导致一辆客车翻车, 死亡 4 人。
29	加油站滑坡	甘肃永靖盐锅峡镇	混合型	8	1989.4.7	加油站地面及围墙普遍开裂, 破坏灌渠 300m。
30	西安机瓦厂滑坡	西安市	黄土型	>10	1990.1	毁坏一车间, 压死 1 人, 造成工厂停产。
31	邑原煤矿滑坡	陕西彬县邑原煤矿	黄土型	>10	1990.5.19	堵塞百子沟河道, 使河水断流, 破坏 24 间房 (锅炉、水塔、抽水站), 7 人死亡, 直接经济损失 30 万元。

续表 1.1 典型黄土滑坡统计表

序号	滑坡名称	滑坡位置	类型	规模 ($\times 10^4 \text{m}^3$)	发生时间	危害情况
32	焦家崖头滑坡	甘肃永靖盐锅峡镇	黄土型	2	1984.7.25	摧毁公路 220m, 中断交通 4 天。
33	焦家崖头滑坡	甘肃永靖盐锅峡镇	黄土型	约 3	1988.6.25	中断交通 20 天, 直接经济损失 20 万元。
34	焦家崖头滑坡	甘肃省永靖县	黄土型	6.40	1989.3.15	中断交通 2 天, 破坏农田 24 亩, 直接经济损失 25 万元。
35	焦家上滩 1#滑坡	甘肃省永靖县	黄土型	约 10	1992.3.21	埋 9 人 (死 2 人, 重伤 2 人), 压埋农田 7 公顷, 果树 1200 棵, 用材林 1000 株, 经济苗圃 1 亩, 自流渠 654m, 摧毁 309 国道 28m, 中断行车 3 小时, 经济损失 26 万元。
36	焦家上滩 2#滑坡	甘肃省永靖县	黄土型	约 7	1992.9.2	重伤 2 人, 轻伤 1 人, 毁电石厂厂房 12 间、焦炭 120 吨、烟炭 200 吨、电石桶 400 个、变压器两台、自流渠 200m, 中断交通 14 小时, 直接经济损失 17.5 万元。
37	庄子村后 老泵房滑坡	甘肃省永靖县	黄土型	约 13	1986.7.20	堵渠 12.5m, 埋农田 12 亩, 小麦 1000 余捆, 树木 1400 株。
38	加油站 北滑坡	甘肃省永靖县	黄土型	17.5	1994.8.28	压埋农田 56 亩, 损粮 2.5 万公斤, 毁自流渠 200m, 压埋石英砂厂 8 间厂房, 公路 250m, 累计损失 47.5 万元。
39	白塔山 186# 大院滑坡	甘肃省兰州市	黄土型	0.25	1986.11.9	压埋 10 间房屋, 死 7 人, 伤 1 人。
40	张定湾滑坡	临潼县小金乡	黄土型	0.6	1992.8.12	摧毁 16 间房屋, 压埋 13 人, 其中 10 人死亡, 3 人受伤, 压死耕牛 5 头。
41	三社沟村滑坡	甘肃永靖县王坪乡	黄土型	570	1995.9.1	压埋大湾岷村小学 11 间校舍, 8 间民房倒塌。
42	河咀村文昌阁 滑坡	兰州市西固区	混合型	110	1999.7.23	摧毁民房 3 间, 压埋电线杆 2 根、通讯电缆 300m。
43	野狐沟机房滑 坡	甘肃永靖县盐锅峡 镇	黄土型	2.5	2000.1.30	压埋路过农用车一辆、上水泵房一间。
44	百子沟滑坡	陕西彬县	混合型	180	1995.7.6	预报成功, 无伤亡。
45	长庆桥滑坡	甘肃西峰市宁县	黄土型	0.1	1998.4.29	摧毁窑洞 3 孔、砖混平房 6 间, 死亡 8 人, 重伤 3 人, 轻伤 4 人。

关系、人们对滑坡的认识水平及预防和防治滑坡的水平有着密切关系。

旧中国，工业不发达，农业设施也很少，滑坡对工农业设施几乎没有危害。新中国建立初期，工农业都得到了迅猛发展，然而，由于对滑坡灾害缺乏认识，以及当时备战备荒的社会环境的需要，许多工矿企业靠山隐蔽，但由于当时社会现状及自然环境较好，滑坡的危害不严重而得不到重视。随着社会、经济的不断发展，尤其是改革开放后，为了加速黄土地区的经济发展，山区建设得以发展，一系列工程设施，如铁路、公路、桥梁、隧道等蜿蜒于山间、坡前，城镇建设向山要地，这一切在改善经济环境的同时也破坏了自然环境，所有的设施乃至人群无形中变成了滑坡灾害肆虐的对象。尤其是 20 世纪 80 年代以来，公路沿线的黄土滑坡，在公路建设中，如天（水）—兰（州）高速公路等，时常发生滑坡影响正常施工；在公路运营中，如天（水）—甘（谷）公路等，因滑坡而中断交通；农业灌溉区的黄土滑坡，破坏灌渠、压埋民房及农田，如甘肃省永靖县盐锅峡灌区等，简直称得上“滑坡实验室”；城镇周边的黄土滑坡，严重影响城市经济发展，如兰州、天水、延安等地，滑坡遍布城镇周边山坡。黄土滑坡在危害日益严重的情况下，才受到各方面的重视。

1.1.1.2 对人类生命的危害

尽管不乏滑坡致人死亡的报道，但滑坡对人类生命的危害，相对于地震、洪水等自然灾害来讲，似乎微乎其微，只是其频发性和广布性是前者无法比拟的。也可以说，滑坡对人类生命的危害是偶发事件。这与滑坡发生、发展、致灾的规律有一定关系。到目前为止，没有前兆的滑坡是很少的。因此，笔者认为，只要采取合理、有效的预防措施，滑坡对人类生命的危害，是可以明显降低的。

(1) 在社会意识上，加强滑坡科普知识宣传工作，使广大群众，特别是可能受到滑坡威胁的人群，了解滑坡，认识滑坡的危害性，掌握滑坡避灾、减灾的一般方法，以免造成像天水锻压机床厂滑坡发生时，一些职工误以为是地震，而钻入桌子底下，从而造成房毁人亡的现象。

(2) 在建设规划时，应进行地质灾害危险性评估工作，提高防灾减灾意识，尽可能使城镇、村庄、厂矿，交通、水利、电讯等设施避开滑坡危险区，如果实在不能避开，也应采取必要措施，确保滑坡稳定，避免造成不必要的伤亡。

(3) 在生产、运营过程中，应各负其责，对出现险情的地段，除及时上报、寻求根治途径外，应立牌警示，避免造成不知情者的死伤。

(4) 在远景规划上，在寻求社会经济发展的同时，注意保护人类赖以生存的自然环境，避免自然环境对人类的报复。

1.1.1.3 对社会安定的影响

从古代到现代，中国人喜依山造居、依水而栖。据调查，在广阔的黄土地区，约 80% 的村、镇建造在滑坡平台上或河流阶地上，而不了解滑坡的存在。有些滑坡在活动之后，成为“死滑坡”，那里的人群可以安居乐业；而另一些滑坡由于种种原因复活了，那里的人群便处于恐慌之中。如甘肃省秦安县魏店乡刘萍组，全村百余户村民就居住在老滑坡平台上^[7]，1997 年 9 月 18 日，一场大暴雨诱发滑坡复活、变形，全村百姓处于惊恐之中。村、镇、县、市逐级上报灾情，有关专业部门对滑坡险情认定后，才得以安定民心。又如兰州市南山滑坡群，时常滑动致灾，造成人员伤亡和经济损失，使在滑坡群前部生活的数万人处于恐慌之中等。

结合滑坡与人群的关系，以及人群对滑坡的作用，分析认为，与其说滑坡是造成人群恐慌、社会不安定的因素，不如说是人类作茧自缚。只要人类在寻求自身发展的同时，不忘保护无辜的自然环境，滑坡灾害自会减少。

1.1.2 黄土滑坡的研究意义

长期以来，人们在认识黄土滑坡、研究黄土滑坡、整治黄土滑坡的道路上，经历了漫长的过程。早在 20 世纪 50 年代以前，人们对黄土滑坡的认识不足，处于被动忍受的局面；解放后，政府部门为了改善西北地区的交通状况，铁路沿线的黄土滑坡受到重视，开始建立起专门机构研究黄土滑坡，但由于种种原因大量的滑坡不能得到根治；进入 20 世纪 80 年代后，尤其是“国际减灾十年活动”以后，我国的滑坡灾害防治事业进入了一个新的发展时期，各地区、各部门投入的人力、物力、财力之多都是空前的，研究领域更为广阔，理论研究不断深入，防灾、减灾的社会效益和经济效益也有了明显提高。

然而，滑坡灾害并没有因此而停止肆虐，同时，由于对滑坡灾害认识的不全面性、实验设备与现实情况的差异性、理论发展与实践应用的不协调性、防治措施因滑坡自身的复杂性而缺乏针对性等，使得滑坡灾害的数量仍在随环境条件的恶化和人类工程活动的频繁不断增加，滑坡灾害的危害随经济的发展日益严重。这就需要地质、工程地质技术人员、专家、学者充分总结经验，找出制约滑坡灾害研究和防治的薄弱点，进行更加深入的研究、探讨，使滑坡研究系统化，将滑坡理论简单化，把复杂计算模式化以及防治措施个体化，以此将滑坡研究水平和整治水平不断推向深入。

为此，开展对黄土滑坡形成的环境地质条件，黄土滑坡的类型、分布、特征、形成机理、运动机理，时间、空间预报以及滑坡防治措施的系统总结、分析研究，解决当前黄土滑坡研究中亟待解决的问题，其作用和意义是显而易见的，概括如下。

(1) 黄土滑坡的主体由不同时期和成因的黄土组成。它是黄土地区常见的、典型的表生地质灾害。其显著特点是：规模不等，发生时间不定，灾变时变形急剧、速度快，具崩塌性，动能巨大，破坏力强，危害严重。因此，深入开展黄土滑坡的基本特征，诸如类型、分布规律、形成条件、变形特征等方面的研究，对提高黄土滑坡灾害认识、防灾、减灾等都有着重要的理论和现实意义。

(2) 以黄土滑坡为研究对象，充分认识黄土滑坡的危害性，进行其类型、特征、形成原因、运动机理、防治措施及防治效益评估模式等方面的系统研究，不仅可以更好地反映黄土滑坡的特征、属性，进一步完善滑坡学学科，而且具有可观的社会价值和经济效益。

(3) 研究黄土滑坡滑带土的类型、性质，寻求滑坡发生、发展的机理，揭示滑坡从孕育、发展直至消亡的全过程，是滑坡灾害预测预报和有效防治的基础。

(4) 预报滑坡的发生时间、预测滑坡危害范围（滑坡滑动距离）、探讨滑坡防治的方法及滑坡整治效益评估模式，可更有效地指导生产实践。

(5) 在强调系统性研究的同时，注重多学科的综合研究方法，加强理论与工程实践、综合减灾相结合，开创黄土滑坡研究的新局面，对保持我国在黄土滑坡研究领域的国际先进水平能起到推动作用。

1.2 黄土滑坡研究的国内外动态及评述

黄土滑坡,已经因其危害性而受到广泛关注,特别是1983年甘肃东乡洒勒山灾难性黄土滑坡发生以后,在我国工程地质界更是激起了一股研究热潮,有关黄土滑坡的实例时有报道,对其研究涉及黄土滑坡的分类,黄土滑坡的基本特征,黄土滑坡的影响因素,黄土滑坡的形成机理、运动机理、监测预报及预防和治理等各个方面。下面仅对黄土滑坡的形成机理、黄土滑坡滑带土特性及其预防和治理等方面的国内、外研究动态进行阐述。

1.2.1 关于黄土滑坡机理的研究

滑坡机理揭示了滑坡从孕育、发展直至消亡的全过程。滑坡机理是滑坡灾害预测、预报和有效防治的理论基础。滑坡机理的研究在揭示滑坡运动过程的同时,对滑坡的稳定性评价,滑坡预报,滑速、滑距研究,滑坡防治等方面也很重要,但由于滑坡自身的复杂性,它仍是世界性难题,至今仍不能很完善地解释,但目前所取得的成绩仍是显著的。

国内外学者从不同的学科出发进行研究,特别是地质学家和土力学家提出过不少假说和见解。在国外,太沙基(Terzaghi, 1950,1967)^[8,9]是从土力学方面研究滑坡机理的开拓者,他主要从滑带土孔隙水压力的变化来揭示滑坡机理,同时也注意到地质条件的控制作用;之后,赫佛利(Haefeli, 1965)^[10]、摩根斯顿(Mogenson,1971)^[11]、伏斯列夫(Hvorslev, 1951)^[12]等定量地研究了孔隙水压对土体强度的影响;斯开普敦(Skepton, 1966)^[13]关于粘性土的残余强度理论和捷尔—斯捷潘尼扬(Ter-Sterpanian, 1975)^[14]关于土体蠕变过程的研究把滑坡机理的研究进一步推向深入。在国内,许多工程地质学家和土力学家以及滑坡防治专家对滑坡形成的条件和作用因素、滑坡的受力状态、滑带土的强度变化规律、滑坡的破坏模式及发育阶段等与滑坡机理有关的问题进行了多方面的探讨和研究,如,徐邦栋^[15]以滑动带成因和形态为主结合滑动特征,阐述了我国铁路上常见的①沿已有软弱构造带(面)滑动的滑坡;②因下伏软岩挤出形成的错落性滑坡;③沿新生弧形面滑动的滑坡;④胀缩土滑坡;⑤黄土崩塌性滑坡等的发生机理和变化过程。晏同珍^[16]根据滑坡发生的初始条件、原因及滑动方式概化了8种机理:①流变倾覆;②应力释放平移;③震动崩落及震动液化平推;④潜蚀陷落;⑤地层悬浮一下陷;⑥高位能飞越;⑦孔隙水压浮动;⑧切蚀—加载等。卢肇钧^[17]从应力状态和应力路径、应变、孔隙水压力、加荷速率、受力时间、土体不均匀性和不等向性等方面综述了土体的破坏机理。张倬元、王兰生等^[18]从坡体的地质结构和受力过程出发提出了五种滑坡破坏模式。胡广韬^[19]提出了滑坡滑动的“临床弹性冲动效应”机理。徐峻岭^[20,21]提出了滑坡滑动的“闸门效应”机理。王兰生提出了“平卧支撑拱”作用机制。王思敬、王效宁^[22]提出了“结构释能”机理。刘光代^[23]提出了“牵引推动式”机制。高根树^[24]提出了两类大型高速滑坡滑动机理:“斜坡牵引失稳产生次生高能滑体与先失稳滑体发生碰撞,经过能量传递调整获得高速”和“滑体下伏岩土体内形成低摩擦次生滑动面使滑体的高速滑动维持较长一段时间”。廖小平、徐峻岭、郑静^[25]提出了“冲击碰撞作用机理和连续可变的块体运动理论”。王家鼎^[26,27,28,29]研究了强震作用下低角度黄土斜坡滑移的复合机理、地震诱发高速黄土滑坡的机理、饱和黄土蠕动液化机理、灌溉诱发高速黄土滑坡的运动机理。唐静等^[30]提出了后部土(岩)体的楔劈作用以及弹射

冲击波作用是突发性高速滑坡形成及发展的重要机理等等。

尽管众多学者在从事滑坡机理的研究，但由于多种原因，对滑坡机理全面系统的研究还很少。同时，针对不同地区、不同滑坡进行的机理研究，很难在另一地区、另一滑坡上使用，即使是类似滑坡也很困难。

1.2.2 关于黄土滑坡滑带土的研究

滑坡与其它斜坡变形最主要的区别之一就是它有一个或多个相对明确的滑动面（带），滑动体沿该面（带）运动。滑坡的发生常常取决于滑动面（带）土体的应力状态和强度的变化，因此，从某种意义上讲，滑坡的形成机理就是滑带土的变形破坏机理。为此，滑带土的研究受到了广泛的重视。

国外研究较早的是伏斯列夫（Hvorslev,1960）^[31]，他对粘土进行剪切试验时，除了观测到不均匀变形外，还发现了与主剪切面斜交的破裂面。今井秀喜等(1963)^[32]研究裂缝产生机理时，用粘土模型作剪切试验，把先出现的羽状裂缝称为雁行排列的张裂缝，把羽状裂缝强烈切割的部分称破碎带。斯开普敦等(Skepton,1966)^[33]对滑带面厚约 20cm 的剪切区进行了微观构造研究，也观察到一些间断排列成阶梯形倾斜破裂面与主剪切面斜交，交角 10~30°，并指出显示脆性破坏。斯开普敦称其为里德尔（Reidel）剪断，并认定里德尔剪断形成于滑动面之前。恰连科（Tchalemke, 1970）^[34]用高岭石做剪切试验，认为大多数土和岩石的剪切破坏形式与里德尔结果相似。山下宏等^[35]用粘土作滑动面，用砂质土作模型体，进行滑坡模型实验，称被破裂面切割成的块体呈阶梯状排列，与滑动面向下斜交。福本正安^[36]根据已有的实验资料指出，当剪应力达到破坏强度的 53%~78%时，即会产生蠕变破坏。

国内，铁道部科学研究院西北研究所^[37]于 20 世纪 70 年代，结合铁路沿线滑坡较系统地介绍了滑带土的强度特征、影响因素和试验方法。

曲焰^[38]在武都滑坡滑带特征及滑面强度研究中，认为滑带应包括三方面内容，即滑面、滑面上下剪裂面和其间受滑动挤压影响的滑带土。他在滑动面上下 1 米厚的范围内观察到各类形态的破裂面，并指出羽状破裂面的形态大小与土的力学性质有关。孙可和^[39]对一定厚度的软弱夹层进行剪切实验，发现夹层中形成一组羽状破裂面，当反剪时形成一组倾斜相反的羽状破裂面，倾向与剪应力一致，并与前一组交叉呈“X”状。

李明华^[40]对粘土滑坡滑动面形成机理进行模型实验研究，提出了破坏带的发展模式图，及裂缝初显阶段、破坏带的形成稳定发展阶段、破坏带的加速发展阶段、连续滑动面的形成阶段等四个阶段，并指出破坏带的发展过程对滑坡的整个发育产生重要的影响。

王恭先^[41]指出“滑坡滑带土的抗剪强度参数是滑坡稳定性定量评价和抗滑工程设计时计算滑坡推力所必需的重要参数”，并说明，有些情况下 ϕ 值增加仅 1~2°，推力就可能成倍增加。同时讨论了不同部位滑带土在不同滑动阶段的变化（表 1.2）。

吴其伟等^[42]对黄河中上游地区红色泥岩（半成岩性质）研究认为，该岩石以钙盐和钠盐为主要介质，风干状态下硬度达 2~3°，但其耐水性极差，遇水盐类被溶解，不到 2 小时即全部崩裂。

徐邦栋、王恭先^[43]在讨论黄土崩塌性滑坡时指出以粉土为主、遭浸湿的黄土滑带土，含水量少时其内摩擦角可达 15~20°，一旦饱含水则降至 5°左右，具有强度骤然降低的特性。

表 1.2 不同部位滑带土在不同滑动阶段的变化 (据王恭先^[41])

滑动阶段	不同地段的滑带土强度取值范围		
	主滑地段	牵引地段	抗滑地段
蠕动阶段	已越过峰值强度	某些部分越过峰值强度	未破坏
挤压阶段	向软化点强度过渡	已全部越过峰值强度	开始受力, 局部越过峰值强度而破坏
滑动阶段	向残余强度过渡	视具体情况, 可能向残余强度过渡	已越过峰值强度向软化点强度和残余强度过渡
大滑动阶段	残余强度	可能为残余强度	主要部分为残余强度
固结阶段	强度有适当恢复		

甘肃省国土整治农业区划研究所在“甘肃省中部灌区黄土台(塬)滑坡与土地塌陷成因及综合治理研究”项目中, 将台塬黄土滑坡滑动带分为三类: (1) 泥岩—黄土滑动带, 由黄土、泥岩接触带浸水泡软的泥化层组成; (2) 泥岩次生滑动带, 由地下水长期作用老滑坡底部泥岩形成; (3) 黄土滑动带, 由黄土泡水, 盐类被溶解, 土体松弛, 泥化构成。

综上所述, 研究者均认为滑动带在滑坡孕育、发育、演变过程中, 具有特别重要的意义。尽管对滑带的认识、滑带的作用、滑带的变形、性状、岩性特征、滑带组成等方面有了一定程度的研究, 但到目前为止, 系统的滑带研究、滑带的形成机理、滑带的微观特征等方面的研究还不够深入。笔者认为, 正如大家公认的滑带在滑坡中的重要作用, 要想从根本上认识滑坡灾害, 就必须对滑坡的重要组成部分——滑动带, 进行从表象特征、物质组成和成分变化、天然状态及滑动状态的物理性质、力学性质、变形因素及过程、微观结构构造等方面深入研究, 探索其形成机理和变形机理, 最终达到准确认识、有效治理的目的。

1.2.3 关于黄土滑坡防治措施的研究

防治措施是根治滑坡灾害、服务于经济建设的永久性措施, 其效果直接与人民生命财产和经济建设有关。

20 世纪 50 到 60 年代, 由于对滑坡产生的条件、作用因素、发生和运动机理以及滑坡的危害性缺乏认识, 基本上属被动治理——即“发生滑坡, 想法治理”, 常采用地表排水、清方减重、填土反压、抗滑挡墙等措施, 但经验表明, 采用这些措施仅能使滑坡处于暂时稳定状态, 难以根治滑坡, 如 1981 年宝成线水害, 造成已治理的 20 处滑坡复活, 复活率达 30%。之后, 开始寻求更有效的治理措施, 20 世纪 60 年代以后, 各类系统地研究滑坡类型、分布、产生条件、作用因素, 及其发生和运动机理的成果相继问世, 但在治理上, 人们重视支挡构筑物的作用, 强调支挡为主, 偏向于用支挡构筑物特别是抗滑桩来解决问題, 而忽视滑坡固有的形成条件、发生原因、破坏机理及几何边界条件, 实践证明, 不切实际的支挡工程并不能根治滑坡, 如意大利 Basilicata 地区的 Craco 滑坡破坏桩、墙等^[44]。20 世纪 80 年代以来, 地质专家和工程技术人员对滑坡治理的思维逐步向综合防治方面发展, 采用支挡结合排水治理滑坡, 效果显著, 这是重视工程地质勘察及滑坡发生规律的结果, 同时出现了一种突破性观点——“预治理”, 即在工程施工中先加固再开挖或边加固边开挖, 实践证明, 这种方法既实用又经济。

黄土滑坡与其它灾害包括其它类型的滑坡有共同点, 也存在着许多差异, 因此, 在治

理措施上也有其特点，目前常采用的方法如表 1.3 所示^[45]。

表 1.3 黄土滑坡防治措施一览表

绕避滑坡措施	排水措施	力学平衡措施	滑带土改良措施
1.改移线路 2.用隧道避开滑坡 3.用桥跨越滑坡	1.地表排水：(1) 滑体外截水沟；(2) 滑体内排水沟；(3) 自然沟防渗。 2.地下排水：(1) 截水盲沟；(2) 盲洞；(3) 平孔群排水；(4) 垂直孔群排水；(5) 井群抽水；(6) 虹吸排水；(7) 支撑盲沟；(8) 边坡渗沟；(9) 洞—孔联合排水。	1.减重工程 2.反压工程：(1) 土堤（护道）；(2) 片石垛 3.支挡工程：(1) 抗滑挡墙；(2) 挖孔抗滑桩；(3) 钻孔抗滑桩；(4) 锚索抗滑桩；(5) 锚索；(6) 支撑盲沟；(7) 抗滑键；(8) 排架桩；(9) 刚架桩；(10) 刚架锚索桩；(11) 锚杆；(12) 锚杆挡墙；(13) 框架锚索	1.化学注浆 2.旋喷桩 3.石灰桩 4.石灰砂桩 5.焙烧

国外，在滑坡防治措施方面亦进行了大量的研究，如 Q. Zaruba & V. Mencl^[46]陈述了欧洲百余个滑坡的防治实例，R. L. Schuster & R. J. Krized^[47]针对美国二十多年滑坡研究和实践资料编写了《滑坡分析与防治》一书，Nakamura Yoshimitsu (1992) 等^[48]讨论了土工支挡物的应用，Nakamura Hiroyuki (1987) 等^[49]研究了剧烈滑动中桩工程的使用、申润植^[50]系统阐述了日本滑坡防治工程的分类体系、单项工程和工程组合的注意事项及施工顺序等等，但多是针对岩石滑坡的，当然许多措施亦适合黄土滑坡，可以借鉴。

1.3 黄土滑坡灾害研究的内容、方法和技术路线

1.3.1 研究内容

本研究旨在系统归纳总结黄土滑坡的研究现状，拟在黄土滑坡分类体系的完善，黄土滑坡滑带土微观结构、构造及变形机理，黄土滑坡时间预报、滑动距离预测，黄土滑坡灾害的有效防治及防治效益评估等方面作较深入的探讨，使黄土滑坡领域的研究更加系统化，以便于生产实际运用。具体研究内容如图 1.1 所示。

1.3.2 研究方法

本研究拟以作者长期黄土地区黄土滑坡的实践为基础，结合大量黄土滑坡实例资料，参阅国内外同类研究，力求将地质学、工程地质学、力学、数学、经济学等多学科的理论和方法融于黄土滑坡的科研、生产实践中；以先进的土工实验设备（剪切仪、压缩仪、击实仪、三轴仪等）、光学设备（显微镜、扫描电子显微镜等）、实验模拟、计算机数值模拟为手段，以多学科的理论为方法，采用生产与科研相结合、实践与理论相结合的研究方法，对所获资料进行分析、处理，系统研究黄土滑坡的分类体系，滑带土的性质，滑坡的形成机理、运动机理以及黄土滑坡的治理措施，获得期望成果。