

灌溉引起的地质环境变化与 黄土地质灾害

——以甘肃黑方台灌区为例

张茂省 朱立峰 胡炜 等著



科学出版社

灌溉引起的地质环境变化与黄土地质灾害

——以甘肃黑方台灌区为例

张茂省 朱立峰 胡 炜 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以甘肃省永靖县黑方台地区为研究对象,采用遥感技术、野外调查、钻探、地球物理勘探、原位试验、岩土测试、大型离心物理模拟、动态监测、数值模拟等手段,在查明黄土滑坡发育分布规律、变形活动特征及其孕灾地质环境背景的基础上,以黄土滑坡的主要诱发因素—水为主线,论述了降水、灌溉水、地下水的“三水”转化关系,反演和预测了灌溉条件下地下水动力场演化过程与发展趋势,分析了灌溉入渗条件下水岩作用引起的黄土工程性质变化,揭示了灌溉诱发型黄土滑坡形成机理与运动过程,以完整冻融期的野外监测深化了冻结滞水效应及其促滑机理,针对性地提出了基于地下水位控制的滑坡风险减缓措施建议。

本书可供从事灾害地质、工程地质、水文地质、环境地质、防灾减灾与防护工程等领域的科研人员、工程技术人员和大中专院校师生阅读与参考。

图书在版编目(CIP)数据

灌溉引起的地质环境变化与黄土地质灾害:以甘肃黑方台灌区为例/张茂省等著. —北京:科学出版社, 2017. 6

ISBN 978-7-03-050728-0

I. ①灌… II. ①张… III. ①灌溉—影响—地质环境—研究—甘肃②灌溉—影响—黄土—地质灾害—研究—甘肃 IV. ①S274②X141③P694

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 279396 号

责任编辑:张井飞/责任校对:张小霞

责任印制:肖 兴/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2017年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017年6月第一次印刷 印张:17 3/4

字数:420 000

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

人类活动，尤其是工业革命后的人类的活动，已经成为一种最活跃的地质营力，深刻地改变着我们赖以生存的地球。不合理的人类工程活动不仅改变了地质环境，还引起环境地质问题，甚至导致地质灾害。灌溉是具有千年历史，以弥补降水量不足及时空不均，保障农业高产稳产的一种人类活动。大量长期的引水灌溉活动会引起地质环境发生什么变化，引起哪些环境地质问题，甚至地质灾害，我们该如何灌溉才能防控灌溉引发的环境问题与灾害风险？

甘肃省永靖县盐锅峡镇黑方台曾是一个无人居住的旱台，20 世纪 60 年代初修建黄河三峡（刘家峡、盐锅峡、八盘峡）水库时，将库区移民安置于此。为解决库区移民生活和灌溉用水，1968 年建成了扬黄灌溉工程。长期大量引水灌溉活动，改变了这一地区原生地质环境条件和地下水动力系统，引起黄土湿陷，导致台面塌陷和裂缝，并在塬边引发了大量的滑坡灾害。

在中国地质调查局“灌溉渗透诱发型黄土崩滑灾害机理研究”（1212011014024）、“甘肃黑方台地区黄土滑坡调查”（12120114025701）项目，以及“十三五”国家科技支撑课题“重大工程扰动区特大滑坡灾害防治技术与示范”（2012BAK10B02）等项目的资助下，对黑方台地区引水灌溉引起的地质环境化与黄土滑坡灾害问题等进行了系统研究。本书就是这三个项目的研究成果。着重论述了黑方台灌区降水、灌溉水、地下水的“三水”转化关系，反演和预测了灌溉条件下地下水动力场演化过程与发展趋势，通过实验测试资料对比分析，论述了灌溉入渗条件下水岩作用引起的黄土工程性质变化，揭示了灌溉诱发型黄土滑坡形成机理与运动过程，通过完整冻融期的野外监测，深化了冻结滞水效应及其促滑机理，提出了基于地下水位控制的滑坡风险减缓措施建议，以期为灌区地质灾害综合治理提供科学依据和技术支撑，也为黄土地质灾害科学认知与防灾减灾提供借鉴。

地质调查是不断探索和不断深化的过程，由于作者水平有限，针对灌溉及冻融诱发滑坡机理及疏排地下水措施等研究内容可能不尽完善，同时，书中难免出现其他疏漏之处，恳请读者批评指正。

作者

2016 年 11 月于西安

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究现状	1
1.2 研究思路	6
1.3 研究内容	8
1.4 主要成果	10
第 2 章 黑方台引水灌区概况	13
2.1 自然地理概况	13
2.2 地质环境条件	15
2.3 农业发展与灌溉历史	29
2.4 地质灾害概况	31
第 3 章 灌区地下水系统演化与发展趋势	38
3.1 水文地质条件	38
3.2 地下水流场现状	45
3.3 地下水流场演化历史	46
3.4 地下水流场发展趋势	53
第 4 章 灌区黄土工程地质性质变化	54
4.1 黄土物理性质变化	54
4.2 黄土宏观力学性质变化	59
4.3 黄土非饱和特性变化	87
4.4 黄土水理性质变化	98
第 5 章 灌溉引起的黄土湿陷	107
5.1 黄土湿陷问题的提出	107
5.2 基于 DEM 的黄土湿陷量估算	108
5.3 基于《规范》的黄土湿陷量估算	110
5.4 灌溉引起的黄土湿陷机理	112
第 6 章 冻结滞水效应及促滑机理	115
6.1 冻结滞水问题的提出	115
6.2 冻结滞水效应野外观测	116
6.3 冻融作用对黄土工程性状的影响	122
6.4 冻结滞水效应数值模拟	129

6.5 冻融作用对斜坡稳定性影响	137
第7章 灌溉引起的黄土滑坡	144
7.1 灌溉诱发的黄土滑坡发育特征	144
7.2 基于地貌重建的灌溉诱发滑坡时空演化特征	179
7.3 灌溉条件下地下水系统演化对斜坡稳定性的影响	187
7.4 灌溉诱发型黄土滑坡形成机理	193
7.5 基于离心模拟的灌溉诱发型黄土滑坡机理研究	205
7.6 灌溉诱发高位黄土滑坡的涌浪分析	226
7.7 灌溉诱发黄土滑坡的风险评估	232
第8章 灌区黄土滑坡风险控制关键技术	245
8.1 基于地下水位的滑坡风险控制	245
8.2 灌溉诱发型滑坡灾害监测预警	263
参考文献	270
后记	278

第 1 章 绪 论

1.1 研究现状

1.1.1 研究背景

黄土高原位于中国第二级地形阶梯，是中华民族的发祥地之一，孕育了悠久的中华文化和华夏农耕文明。同时，黄土高原也是世界上水土流失最严重的地区，强烈的水土流失塑造出千沟万壑、沟壑纵横、极为破碎的地貌景观，黄土台塬以其相对开阔平坦的地形成为黄土高原较为理想的农耕用地，是黄土高原的粮食主产区，如“天下黄土第一塬”甘肃董志塬塬面南北长 110km，南北最宽处达 50km，塬面面积为 910km²，素有“陇东粮仓”之称。

受青藏高原隆升和东亚季风影响，地处中国西北内陆的黄土高原地区为干旱半干旱气候，整体降水稀少，蒸发强烈，且降水集中程度高，与农业用水需求时空匹配程度差，即使靠近大河干流，黄土台塬也因“水低地高”而多为旱作农业，靠天吃饭，农业单产低且不稳定，历史上不乏逢连旱之年常因颗粒无收而饿殍遍野背井离乡之记载，如陇中地区虽有黄河上游干支流的丰富地表径流资源之地利，但因难以提灌利用，自古以来就有“陇中苦甲天下”之说。

自先周后稷曾孙公刘在芮鞬（今甘肃庆阳、泾川一带）始创引水灌溉（《史记·周本纪》）屹始，黄土高原农业引水灌溉已历经长达 4000 余年的悠久历史，修建了众多著名引水灌溉工程，如秦朝嬴政元年（公元前 246 年）修建的郑国渠，汉武帝元朔至元狩年间（公元前 128 年至公元前 116 年）修建的龙首渠。新中国成立以来，除了兴修大中型蓄水和自流引水灌溉工程之外，针对黄土台塬区新建了较多的提水电灌工程，如 1974 年建成的甘肃景泰川电力提灌工程设计提水流量 28m³/s，最大提水高度为 602m，设计灌溉面积为 80×10⁴亩^①，是目前黄土高原地区最大的电力提灌工程。

引水灌溉在大幅提高农业单产的同时，因长期沿袭粗放的大水漫灌方式，改变了受水区水均衡条件，致灌区地下水位上升，在地下水位浅埋区，引起明水、土壤盐渍化及黄土湿陷现象，在黄土台塬周边斜坡地带引起滑坡频发等。在黄土高原地区，灌溉渗透诱发的

^① 1 亩 ≈ 666.67m²。

黄土滑坡灾害普遍分布,主要分布于陕、甘、宁、青、豫、晋六省(区),尤以泾、渭、湟水河干支流沿岸最为突出,且多呈带状群发,甚至形成连绵数十公里长的滑坡群(带)。因大水漫灌诱发滑坡灾害典型者,如陕西泾阳南塬、甘肃永靖黑方台,因城市周边山体绿化喷灌诱发滑坡灾害典型者,如西宁一颗印滑坡、兰州文庙滑坡,因灌渠渗透诱发滑坡灾害典型者,如陕西华县高楼滑坡。其中,大水漫灌诱发滑坡灾害因其群发性和频发性之特点,所形成的滑坡灾害最为严重,已成为黄土高原乃至全国地质灾害最为频繁的地段之一,在一定程度上制约了新型城镇化和区域社会经济发展,以甘肃黑方台地区最为典型。

2011年中央一号文件强调,“水利是现代农业生产不可或缺的首要条件,是经济社会发展不可替代的基础支撑,是生态环境改善不可分割的保障系统……着力加快农田水利建设,推动水利实现跨越式发展”。在中国干旱缺水的西北内陆,尤其是黄土高原地区,农田水利建设事业蓬勃发展的同时,如何避免及降低灌溉引发的地质灾害已成为兴利除弊和生态文明建设中必须解决好的关键问题。

1.1.2 国内外研究现状

从黄土的水岩作用机制、灌溉入渗机理、灌溉诱发型黄土滑坡机理、冻结滞水促滑效应和灌溉诱发型黄土滑坡防治技术5个方面回顾国内外研究的现状及面临的问题。

1. 黄土的水岩作用机制

国内外对黄土水敏性的研究集中在微结构、水岩物理化学作用和宏观力学特性三方面。

微观结构研究方面,Sajgalik等(1990,1994)采用扫描电镜研究了斯洛伐克黄土结构特征,从微观角度对黄土崩解机理进行了解释。Derbyshire等(1994)研究了上更新统黄土不同含水率下的强度参数,并指出孔径、颗粒形态等微结构特征是黄土水敏性发挥效应的内在原因。高国瑞(1980)、王永炎和腾志宏(1982)、雷祥义(1987)、胡瑞林等(1999)系统研究了中国黄土的微结构特征,确定了黄土微结构模型,并用来解释黄土湿陷性。

在黄土水敏性相关的水岩物理化学作用研究方面,公认黄土遇水后产生物理化学反应,造成化学组分与土体结构发生改变,从而导致抗剪强度弱化。Zhang等(2013)利用不同NaCl浓度的脱气蒸馏水制作饱和黄土样品开展不排水直剪试验,试验结束后重塑样品,用纯净蒸馏水洗盐后再次进行不排水直剪,从而模拟灌溉水入渗和排泄两个相反过程中,黄土积盐和淋滤洗盐作用对黄土不排水剪切强度的影响机制,结果表明,积盐时,随着盐分浓度的持续增加,饱和黄土不排水剪切峰值和稳态强度呈现先增加后减小的规律,而在洗盐后,饱和黄土强度逐步恢复至原值,证明盐分对黄土强度的影响是个可逆的过程。

在黄土水敏性相关的宏观力学特性研究方面,Feda(1988)、Frankowski(1994)、Rogers等(1994)研究了黄土湿陷性的前提、标准、归一化特性;Lutenegger和Hallberg(1988)、Milovic(1988)、Dijkstra等(1994)研究了不同层位黄土的强度和稳定性随着含水率的变化规律。谢定义(2001)将黄土水敏性的宏观力学特性概括为黄土强度和黄土湿陷性两部分,且呈现出了由浸水湿陷量到湿陷敏感性,由狭义的浸水饱和湿陷到广义的浸水增湿湿陷,由

单调的增湿变形到增湿脱湿、间歇性湿陷变形,由增(脱)湿路径到增(脱)湿路径与加(卸)荷路径的耦合,以及由宏观特性分析到宏观与微观相结合的发展趋势。

2. 灌溉入渗机理

灌溉诱发黄土滑坡的根源在于引水灌溉改变了原生水文地质条件,从而使地质环境条件向利于滑坡孕灾的方向转变。因此,灌溉入渗机制研究是灌溉诱发型黄土滑坡机理研究的基础。

李云峰(1991)、李喜荣(1991)、薛根良(1995)、李佩成等(1999)、赵景波等(2001)对黄土塬区三水转化规律及不同层位黄土水文地质参数和含水层特征的研究较为丰富。但黄土是具大孔结构的特殊类土,存在大量垂直节理裂隙、动植物孔洞以及在此基础上扩展而来的落水洞,加之地表植被覆盖情况变化,地表水入渗边界条件变化大,导致黄土入渗表现为活塞流和多种形式优势流组合成的混合流模式(徐学选和陈天林,2010)。优势流研究最早可追溯至19世纪80年代,但直到20世纪80年代之前,优势流问题都未引起科学界足够的重视。Beven和German(1982)发表了关于土壤优势流的论著,系统介绍了优势流研究历史,采用试验验证和理论分析研究了优势通道对地表水入渗和扩散的影响,是优势流研究的里程碑,成为土壤水文学历史上引用率最高的文献之一。此后,针对优势流入渗模式、优势流影响因素、优势通道空间展布、优势流水分运移规律等方面问题,开展了从理论模型分析到数值分析,从原位监测到室内物理模拟等多种技术手段的研究工作。在优势流理论模型研究方面,可归纳为四类模型来描述,其中,最主流的是二域模型及相关改进模型(秦耀东等,2000)。二域模型将土体分为基质域和优先域,采用Darcy定律-Richards方程描述基质域,而对于优先域则有不同的刻画方法,包括运动波理论、黏性流假设条件下的边界层流动理论、滤波理论等。但现有四大类模型均难以准确获取模型参数,且对于优势通道的随机分布性难以刻画,导致模型计算与实际入渗情况出入较大。

优势流对于灌溉水或降水入渗补给地下水进而促发滑坡具有重要控制作用。许领等(2008, 2009a, 2009b, 2010)以陕西泾阳南塬灌溉型滑坡为例,分析了灌溉引起的裂缝形态、发育规律、演化模式,认为灌溉引起的裂缝、落水洞等优势通道增加了灌溉诱发滑坡的概率,对于黄土滑坡的演化和群体性分布具有重要的意义。Xu(2011)通过黑方台地区的原位灌溉试验研究了灌溉水快速入渗对滑坡的影响,认为灌溉水通过裂缝等优势通道快速入渗对区域地下水流场影响较小,由其所产生的超孔隙水压力导致土体局部液化使斜坡产生局部破坏,塬面入渗引起区域地下水位上升才是引起高速远程滑动的主因。

3. 灌溉诱发型黄土滑坡机理

灌溉诱发型黄土滑坡机理研究体现在渗流引起斜坡岩土体力学的响应及对斜坡下滑力增加或抗滑力减小方面。

Terzaghi K早在1950年就将降水诱发滑坡机制概化为“降水期间或降水之后斜坡体内孔隙水压力升高使得潜在滑动面上的有效应力及抗剪强度降低,从而诱发滑坡”,认为孔

压变化规律是研究降水诱发型滑坡机理的关键。Hutchinson (1988)、Sassa (1984) 等提出了结构破坏—孔压上升—液化的水致土质滑坡发生机理。Sassa (1985) 进一步指出, 当饱和度超过 85% 时足以产生超孔隙水压, 从而导致滑坡发生。

黄土组成是以粉粒为主, 具有架空结构, 水的参与使黄土成为一种极易产生液化的土, 众多学者根据灌溉诱发黄土滑坡时普遍出现的流滑现象提出液化形成机制。王兰民和刘红玫 (2000) 对饱和黄土液化机理与特性开展了研究, 建立了饱和黄土孔隙水压力和应变的增长模型。周永习等 (2010) 对黄土滑坡流滑机理进行了试验研究, 认为大多数情况下饱和黄土表现为稳态特性, 只有疏松的黄土表现出准稳态特性。王家鼎 (1992, 1999) 在黑方台黄土滑坡泥流调查基础上, 提出了“饱和黄土蠕 (滑) 动液化”的概念, 以及饱和黄土的蠕动液化机理。金艳丽和戴福初 (2007)、武彩霞等 (2011) 基于斜坡土体的原位应力状态及应力路径, 对原状黄土开展了等压/偏压固结不排水剪 (ICU/ACU) 和常剪应力排水剪 (CQD) 试验, 从饱和黄土的应力路径角度探讨了灌溉水诱发黄土滑坡形成的“静态液化”机理。

近年来, 从非饱和土力学角度研究水致黄土滑坡力学机制逐步成为热点。虽然早在 1931 年 Richards 就将 Darcy 定律推广应用到非饱和渗流中, 建立了非饱和渗流水分运动控制方程——Richard 方程。但在 20 世纪 50 年代以前, 人们并没有认识到基质吸力变化对斜坡稳定性的影响, 非饱和土力学只属于土壤学的研究领域。20 世纪 50 年代, 美国公路实验所最早注意到处于非饱和状态的土中的基质吸力对公路及机场设计的重要意义 (Croney, 1952); 1961 年制造出第一台用于非饱和土三轴试验的仪器 (Bishop and Donald, 1961); 随后, Bishop (1959)、Satija (1978)、Ho 和 Fredlund (1982) 等进行了大量的有关非饱和土的力学试验; Fredlund 和 Morgenstern (1978) 等得出适用于非饱和土体的双变量引申 Mohr-Coulomb 抗剪强度公式, 进而提出了考虑基质吸力的边坡稳定性分析方法——普遍平衡极限法 (1981); Lam 和 Fredlund (1987) 研究了降雨入渗对边坡稳定性的影响, 综合考虑了土体入渗能力、土的初始饱和度、降雨强度与降雨持续时间、暴雨前降雨量及坡面的防渗情况等因素, 建立了饱和-非饱和渗流控制方程, 在此基础上对边坡稳定性参数进行研究; 李兆平和张弥 (2001) 以体积含水率作为因变量, 建立了求解降雨入渗过程中土体瞬态含水率的数值方法, 并实测了土体的水分特征曲线, 结合非饱和土强度理论, 建立了非饱和土边坡稳定性分析的方法; 詹良通等 (2003) 采用人工降雨模拟试验, 发现降雨使浅层土体中的孔隙水压力和含水量大幅度增大, 坡体水平应力和竖向应力的比值接近极限值, 从而使得土体沿裂隙面局部破坏引起渐进式滑坡; Jonathan 等 (2009) 根据在美国西雅图 puget sound 滑坡上进行了吸力和含水量监测, 并基于吸应力理论进行了滑坡的准确预测。

4. 冻结滞水促滑效应

Yanagisawa 和 Yao (1985) 研究了冻结条件下饱和土的水分运移、热参数变异、冻结前锋运移速率, 采用有限差分法求解了冻结条件下的饱和土热传导方程, 将之与室内试验对比, 两者的温度场、含水量分布、冻结深度非常吻合。Czurda 和 Hohmann (1997) 为了确定冻结区的危险滑动面和抗剪强度, 开展了 5 种黏性土在不同冻结条件下的直剪试验,

表明冻土的抗剪强度随着时间和温度变化,其主要受孔隙冰黏聚力的影响,而摩擦角基本是常数。Kudryavtsev (2004) 和 Alekseev 等 (2007) 分别通过原位、室内试验和有限元分析研究了冻融导致的挡土墙后部土体的土压力场和变形场。

冻融作用对滑坡的促发机制方面,叶米里扬诺娃 (1986) 指出了冻融泥流现象; Harris 等 (2000) 利用离心模型模拟了冰土层融化过程中斜坡的运动机制,揭示了冰冻-融化过程中斜坡土体位移变化规律与融化层的深度、斜坡坡度、融化时间和冻融循环次数有关,解释了冻融期浅层滑坡机理。

针对中国北方地区冻结滞水效应诱发黄土滑坡高发的因素,吴玮江 (1996, 1997) 在分析西北季节性冻土地区滑坡发生时间规律和斜坡变形动态规律的基础上,提出季节性冻融作用产生的冻结滞水效应使斜坡区地下水富集、土体软化范围扩大以及静、动水压力增大,是冻融期滑坡多发的重要外动力因素。王念秦 (2008) 以甘肃省黄土滑坡为研究对象,进一步探讨了季节冻土区冻融期滑坡的基本特征和形成机理,认为冻融期黄土滑坡主要集中在冻融期末期,且具有规模大、滑速快、滑距远、危害严重等特点。王念秦和罗东海 (2010) 针对黄土斜坡灾害及冻融作用特点,利用表层冻结温度场数值模拟、冻结前后地下水聚集模型分析及实例验证分析等手段,揭示了边坡表层土体冻结过程、坡体内地下水集聚过程,探讨黄土斜坡表层冻结效应及其稳定响应,认为表层冻结作用由表及里进行,大约在冻结 3 个月后达到当地最大冻深,并以简化的地下水聚集模型推导得到坡体内地下水浸润线方程,确定冻结滞水作用使黄土斜坡稳定性降低 25%。

5. 灌溉诱发型黄土滑坡防治技术

长期农业漫灌导致地下水位上升是灌溉诱发型黄土滑坡灾变的主要诱因已成公认,众多学者针对该类滑坡的防治措施进行了研究。雷祥义 (1995) 认为泾阳南塬滑坡防治的关键是控制地下水位,应通过渠道防渗、改善灌溉模式、井渠结合并加大地下水抽排量以控制地下水位升势来进行治理。王家鼎 (2001) 通过对黑方台滑坡群形成与运动机理的系统研究,提出了一套针对该滑坡的防治措施,包括改革灌溉方式,集水井、渗水竖井、平孔等方式疏排地下水,辅以削坡及草袋挡土墙等简易工程措施等。吴玮江等 (1999) 对于旱地区农业灌溉引起的地质灾害提出了加强规划和科学研究、改变灌溉方式、灌排结合及强化管理等防治对策。陈瑾和韩庆宪 (1999) 通过探讨灌区黄土沉陷与水土流失的机理,提出了从治水入手,采用节水灌溉技术,配合工程措施及植物措施治理,达到合理利用水资源、根治水土流失、防治地质灾害的目的。李海军等 (2003) 通过对黑方台焦家崖头应急削坡治理工程认识到削坡治理只能保证滑坡的暂时稳定,是治标不治本的措施,节水灌溉、改变滑坡区水文地质结构才是治理该类滑坡的根本。王念秦 (2004) 针对灌溉型滑坡提出综合防治措施,包括重视村镇建设区划、耕作区划、水利设施区划、地质灾害区划等综合规划,地表和地下相结合的综合排水措施,削方减载、护坡挡墙等简易工程措施。王志荣等 (2004) 认为过量灌溉引发的滑坡灾害应以预防为主,治理为辅,改变灌溉方式,采取包括工程治理措施、排水措施、生物措施在内的综合治理措施。孔令辉 (2008) 将黑方台滑坡群的治理措施概括为节水灌溉措施、台缘排水措施、削方减载措施、边坡支挡措

施、生物植被措施等。综上,灌溉诱发型黄土滑坡防控技术应突出灌溉活动打破了地下水系统的天然水均衡场,长期的正均衡导致地下水位抬升,引发斜坡地带应力场的改变,进而引发滑坡。灌溉活动引发黄土滑坡灾害防治的关键是有效控制地下水位,但以往研究多是泛泛而谈一些控水策略,缺乏监测和试验资料,无力指导治理设计和施工。

综上所述,前人做了大量的地质调查与科学研究工作,在本项目实施时,黑方台地区主要存在5个关键问题:一是水文地质条件不清楚。大水漫灌的灌溉方式引起塬区地下水位抬升是导致黑方台灌区滑坡发育的基本原因。但是区内的水文地质条件尚不十分清楚,主要表现为无地下水位数据,更谈不上地下水流场,没有渗透系数、灌溉和降水入渗系数等水文地质参数,也不了解各层地下水之间的水力联系,对地下水形成机理与地下水位控制缺乏研究。二是对灌溉引起的滑坡启动机理的研究不够深入。灌溉入渗条件下的岩土参数如何变化、地下水位变化与斜坡变形及其稳定性之间的关系、保障滑坡稳定的地下水安全水位等问题缺乏深入的研究。三是冻结对滑坡启动作用的研究尚停留在定性分析阶段。黑方台灌区具有冬春交替季节滑坡多发的特点,存在冻结滞水促滑效应,但是,冻结引起的地下水位壅高幅度和范围有多大目前尚无实测资料,也未做深入的研究。四是滑坡灾害综合整治或风险控制缺乏科学依据。对于黑方台灌区各区段特定的地质结构条件,其斜坡的稳定性主要取决于地下水位,地下水位若能得到有效的控制,那么滑坡灾害风险也就得到了基本控制。但是目前在地下水位防控方面的研究还远远不足,例如地下水位控制在什么范围内才能有效防止滑坡发生?采取什么措施才能够将地下水位控制在合理的范围之内?还需要那些工程措施和搬迁避让措施辅助,这也表明当前滑坡灾害综合整治或风险控制缺乏可靠的科学依据。五是灌溉引起的黄土湿陷问题有待深入研究,需要进一步回答以下几个问题,黑方台地区灌溉引起的黄土湿陷量有多大,以及在空间是如何分布的;灌溉引起黄土湿陷的构成及其机理;基于地下水位变化的黄土湿陷量预测与湿陷灾害风险控制技术。

1.2 研究思路

1.2.1 总体思路

依托国土资源地质矿产调查专项“灌溉渗透诱发型黄土崩滑灾害机理研究”(项目编码1212011014024)和国家科技支撑计划专题“甘肃黑方台地区滑坡群防治技术与示范研究”(专题编号2012BAK10B02-5),以甘肃省永靖县黑方台地区为研究对象,运用水文地质学、工程地质学理论为指导,采用遥感技术、水工环地质综合调查与动态监测、水文地质钻探与试验、地球物理勘探、现代测试技术、大型离心模拟、现代信息技术、数值模拟等手段,从野外调查与监测、室内模拟、机理研究、防治技术4个层次,以黄土滑坡的主要诱发因素——水为主线,揭示降水、灌溉水、地下水的“三水”转化关系,查明灌溉诱发型黄土滑坡形成的坡体地质结构和灾害发育特征、变形特征、成灾模式,研究灌溉诱发型黄土滑坡形成机理及运动特征,建立基于地下安全水位的滑坡风险管理模型,研发面向

斜坡稳定的地下水位控制关键技术和适宜的工程防治措施，为灌溉诱发黄土滑坡防治提供理论依据和技术支撑。

1.2.2 技术路线

黑方台地区灌溉引起的地质环境变化与黄土地质灾害研究的技术路线主要围绕5个方面开展（图1.1）。①地下水形成机理与地下水位控制研究：通过野外调查（大比例尺剖面测制）、大孔径水文地质钻孔和抽水试验、室内外实验、动态监测等手段，查明

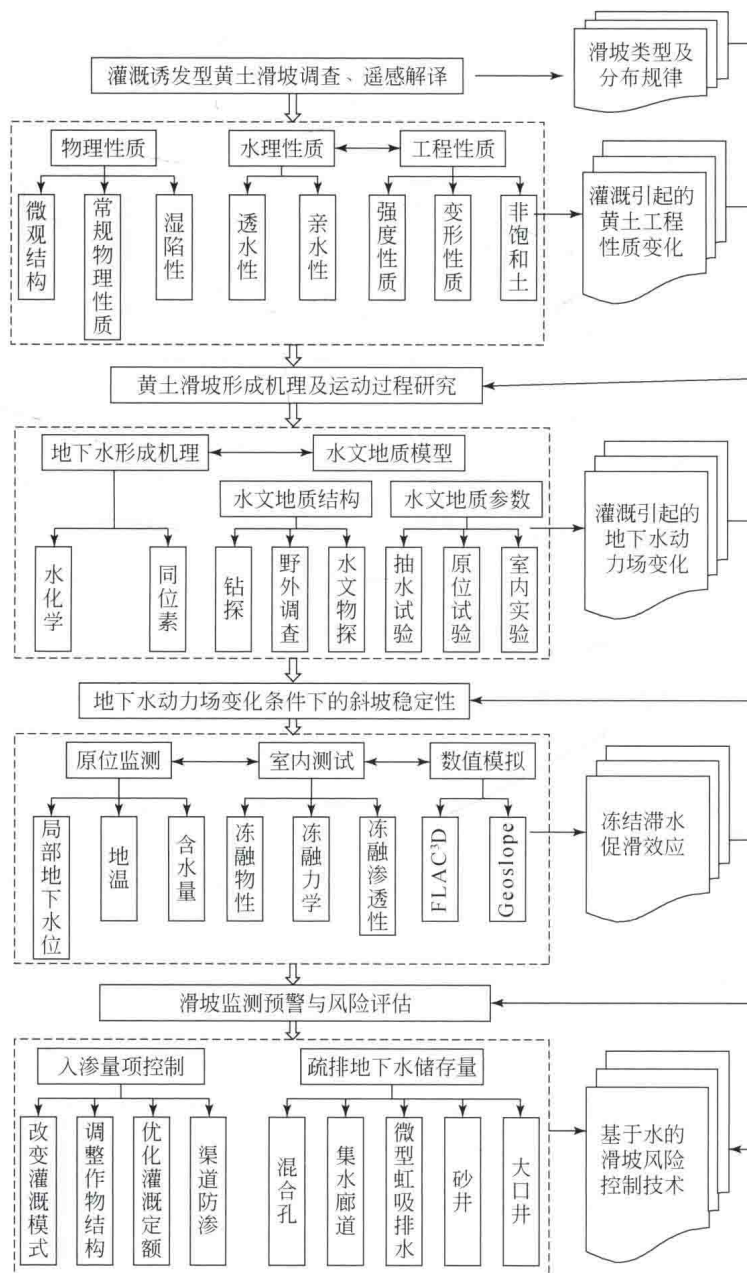


图 1.1 技术路线图

黑方台灌区水文地质结构,获取含水层水文地质参数以及灌溉与降水入渗系数,建立黑方台灌区地下水三维数值模拟模型和地下水管理模型。②滑坡启动机理研究:通过原位大剪试验及室内试验,获取天然状态和地下水作用下的岩土的物理、力学及水理性质参数;调查有滑坡分布发育特征、破坏模式、运动学过程和致灾范围,调查现有的所有滑坡隐患点(斜坡)的变形特征及分布,选择典型斜坡段进行变形监测;分析地下水位变化与滑坡变形破坏之间的关系,开展地下水位与滑坡稳定性研究,探索滑坡启动机理,确定基于滑坡稳定的地下水安全水位。③冻结引起的地下水位壅高幅度和范围研究:收集当地气象站历史观测资料,分析气温、地温和冻结深度特征;开展原位气温、地温、冻结深度以及局部地下水位动态观测;运用历史观测数据和原位测试数据,分析确定由于冻结而引起的地下水位壅高的幅度和影响的范围。④滑坡灾害风险控制研究:在前述的研究基础上,建立地下水位与滑坡稳定系数耦合预警模型,通过基于滑坡稳定的地下水安全水位,建立基于地下水位的滑坡风险控制管理模型;同时,根据滑坡距离圈定搬迁避让区范围,提出适宜的地下水位控制措施和工程防护措施,实现滑坡风险控制的目标。⑤灌溉引起的黄土湿陷研究:通过不同时期的地形图对比、水池变水塔的位移观测,计算分析黑方台地区灌溉引起的黄土湿陷量大小,以及在空间上是如何分布的;从非饱和黄土增湿过程中的湿陷和饱和湿陷探讨灌溉引起黄土湿陷的构成及其机理;建立地下水模拟模型和管理模型,从而实现基于地下水位变化的黄土湿陷量预测与湿陷灾害风险控制。

1.3 研究内容

1.3.1 灌溉引起的地下水系统演化研究

(1) 地下水形成机理与地下水位控制研究内容主要包括水文地质结构研究、地下水场研究、水文地质参数研究等。

(2) 灌溉和降水入渗系数研究内容主要包括灌溉水入渗模拟试验、土水势和含水率观测、地下水位动态监测等。

(3) 地下水管理模型研究内容主要包括地下水三维数值模拟模型研究、地下水管理模型研究等。

(4) 黑方台灌区地下水流系统演化历史与发展趋势预测等。

1.3.2 灌溉引起的黄土工程性质变化研究

(1) 灌区黄土工程性质研究内容主要包括黄土物理性质、水理性质、力学性质及微结构室内测试。

(2) 临近的非灌区黄土工程性质研究内容主要包括黄土物理性质、水理性质、力学性

质及微结构室内测试。

(3) 灌区与临近的非灌区黄土物理性质、水理性质、力学性质及微结构对比研究。

1.3.3 灌溉引起的非饱和黄土湿陷研究

(1) 基于不同时期 DEM 的黄土湿陷量及其空间分布估算。

(2) 基于《湿陷性黄土地区建筑规范》的黄土湿陷量估算。

(3) 灌溉引起的饱和与非饱和黄土湿陷机理研究。

(4) 基于地下水位的黄土湿陷趋势预测与湿陷灾害防控。

1.3.4 灌区冻结滞水效应及其促滑机理

(1) 气象站资料收集与冻融资料分析主要包括收集当地气象站历史观测资料,分析气温、地温和冻结深度特征,统计该区冻结深度特征值及其与气温之间的相关关系。

(2) 原位气温、地温、冻结深度以及局部地下水位观测主要包括在滑坡前缘选择地下水溢出带,开展原位气温、地温、冻结深度以及局部地下水位动态观测,获取在一个完整冻结期内的冻结深度、气温、地温的变化数据。

(3) 冻结引起的地下水位壅高幅度和范围研究主要包括运用历史观测数据和原位测试数据,分析确定由于冻结而引起的地下水位壅高的幅度和影响的范围及其随气温的变化规律。

1.3.5 灌溉引起的滑坡灾害与风险控制问题

1. 滑坡启动机理研究

1) 地下水位变化与滑坡变形破坏之间的关系研究

通过地下水形成机理与地下水位控制研究,建立了地下水三维数值模拟模型,可以恢复滑坡前的地下水渗流场;通过斜坡变形破坏特征研究,恢复滑动前的三维地形和应力场,动态模拟由于地下水水位变化引起的滑坡变形破坏过程,从而研究地下水位与滑坡变形破坏的关系。

2) 地下水位与滑坡稳定性分析

采用 FLAK^{3D}、GEOSLOP 等软件,根据本次实测剖面和试验获得的岩土参数,分段计算斜坡稳定性系数随地下水位变化的序列,分析滑坡在启动时的渗流场和应力场特点,总结滑坡启动的判别条件。

3) 基于滑坡稳定的安全水位研究

地下水位壅高是黑方台灌区滑坡形成最主要的诱发因素,通过地下水位变化与滑坡变形破坏之间的关系研究、地下水位与滑坡稳定性分析,可以确定一个或一组能够保障黑方台周边斜坡稳定的地下水最高水位。换句话说,只要保持该区地下水面低于某一个面,其

周边的斜坡将是稳定的,即基于滑坡稳定的地下水安全水位研究。从而定量地总结出黑方台灌区黄土滑坡的启动机理。

2. 滑坡风险控制管理模型研究

1) 地下水位与滑坡稳定系数耦合预警模型研究

对于黑方台灌区各区段特定的地质结构条件,其斜坡的稳定性主要取决于地下水位,不同的地下水位将对应不同的稳定系数。在前述的研究基础上,可以建立黑方台灌区不同区段地下水位与滑坡稳定系数耦合预警模型。

2) 基于地下水位的滑坡风险控制管理模型研究

黑方台灌区地下水位若能得到有效的控制,那么滑坡灾害风险也就得到了基本控制。通过面向斜坡稳定的地下水安全水位的研究结果,将斜坡稳定系数目标函数转换为地下水位目标函数,约束条件仍然为灌溉量控制、疏排水量控制等,从而建立基于地下水位的滑坡风险控制管理模型。

3. 滑坡风险控制措施研究和优选

黑方台灌区黄土滑坡灾害应坚持以防为主,预防、治理、避让相结合的原则。应以地下水位控制为防,以部分村民搬迁为避,以局部采取简单工程措施为治。

1) 地下水位控制措施

(1) 摒弃大水漫灌的粗放式灌溉方式,全面衬砌渠道,减少灌溉水渗入量;

(2) 挖掘大口径集水井,抽吸地下水,降低地下水位;

(3) 施工渗水竖井,穿透隔水层,使黄土中地下水能通过竖井渗入下部砂砾石层,降低黄土中地下水水位;

(4) 水平孔排水。在滑坡体前缘施工平孔,并采取防冻措施,疏通地下水排泄通道,从而降低地下水位;

(5) 裂缝回填。及时回填、夯实台面上和斜坡体上出现的裂缝、落水洞等,防止灌溉水和雨水沿裂缝快速鱼贯而入。

2) 搬迁避让措施

通过对已有滑坡滑移距离和致灾范围的调查,以及形成机理和运动特征的分析,结合现有斜坡的变形特征,分段确定斜坡破坏失稳后的滑移距离和可能的致灾范围,圈定搬迁避让区范围,采取搬迁避让措施。

3) 工程措施

采用施工简单、速度快、造价低、易见效的方式,在局部地段实施工程措施,如局部支挡、削坡、护坡等。

1.4 主要成果

引入国际先进地质灾害风险评价技术方法与理念,开展了大比例尺滑坡风险填图,结

合钻探、物探、大型离心模拟、原位试验、室内测试、动态监测等手段,在查明黄土崩滑灾害分布特征、发育规律及其孕灾地质环境条件的基础上,以水为主线,着重开展了灌溉入渗机理、黄土工程性质灌溉效应、灌溉诱发型黄土滑坡机理、冻融诱发型黄土滑坡机理研究,提出了基于地下水位控制的滑坡风险减缓措施建议,取得的主要成果如下。

(1) 揭示了引水灌区灌溉入渗机理和地下水动力场演化过程,预测了不同灌溉模式下地下水流程系统发展趋势。

克服饱和黄土缩径难题成功实施水文地质钻探,查明水文地质条件,揭示不同含水系统水力特征,建立了涵盖区域-滑坡区的地下水动态监测网。通过抽水试验、灌溉入渗模拟、渗透实验、颗分-渗透模型系统获取了水文地质参数,尤其是对传统“Darcy 实验”方法及装置改进后,原创性地将实验从室内移植到原位,获取了包气带浅表层黄土的垂向渗透系数。这些参数,尤其是与崩滑灾害形成攸关的黄土含水层水文地质参数的获取,为基于地下水位控制的滑坡风险减缓提供了水文地质科学依据。通过入渗通道调查、水文物探、水化学和同位素等方法,揭示了灌溉水入渗以裂隙、落水洞等优势通道点源快速入渗为主,台塬区面源活塞流脉冲式入渗为辅。在此基础上,反演了灌溉条件下地下水动力场演化过程,1990 年以前地下水位上升速率为 0.57m/a ,1990~2012 年,平均上升速率为 0.25m/a ,预测了不同灌溉条件下地下水流程系统发展趋势,若继续维持现有灌溉量,2020 年前地下水位升幅为 $0.3\sim 0.4\text{m/a}$ 。

(2) 多手段多视角揭示黄土工程性质的灌溉效应。

从宏观到微观,从原位试验到室内测试,从瞬时强度到时效变形,从经典土力学到非饱和土力学的多手段多视角揭示了黄土工程性质的灌溉效应。原创性开展了原位饱和直剪试验,成功获取了饱和黄土的原位抗剪强度指标。结合室内非饱和土增湿与流变试验,表明黏聚力随着含水量的增加呈对数降低,内摩擦角以线性递减,饱和黄土较之天然原状黄土,黏聚力锐降达 60%,内摩擦角降低 3.45%。灌溉入渗水岩作用产生灌溉效应致黄土原生结构及构造改变,力学强度显著弱化是滑坡频发的主控因素。

(3) 首次通过野外监测证实并分析了冻结滞水效应及促滑机制。

首次以完整冻融循环期内的野外原位分层地温及孔隙水压力、地下水动态组成的冻结滞水效应剖面监测,证实了冻结滞水现象的真实存在,确定季节性冻结引起的地下水位壅高幅度为 $40\sim 110\text{cm}$,影响范围达坡体内部 30m 。结合冻前-冻结-解冻后的黄土力学性质测试,剪出口附近饱和状态黄土冻结后的强度较冻前激增约 80 倍,经历 15 次冻融循环解冻后,强度较冻结期损失达 99%,表明冻结造成土体强度增高,冻融循环引起冻胀与融陷造成岩土损伤致强度锐降,冻结相当于在滑坡前缘剪出口形成天然“抗滑挡墙”,而冻融期反复冻结融化循环造成“挡墙”溃屈,剪出口部位强度短期内的突然丧失是冻融季节滑坡高发的根本所在。

(4) 结合大型离心模拟,分析了灌溉诱发型黄土滑坡形成机理。

在总结滑坡灾害类型、分布规律和发育特征的基础上,结合大型离心物理模拟,灌溉诱发型黄土滑坡灾害形成机理主要是灌溉入渗造成地下水位上升,非饱和带土体含水量增高,从而在斜坡体增重的同时,土体强度降低,从而在自重作用下产生蠕滑,加之滑坡前缘高渗透水力坡降,以及灌溉水以优势通道跑漏时潜蚀掏蚀加速滑坡体变形的进一步发