



## 田 佳

林学博士，2010年毕业于北京林业大学水土保持学院，美国密苏里州立大学访问学者（2015—2016）。现任宁夏大学农学院副教授、研究生导师、林学教研室主任。主要从事水土保持工程方面的研究，在本领域期刊发表论文30余篇，授权专利2项；主持国家自然科学基金2项、宁夏自然科学基金2项、林业厅横向课题1项，参与科研项目或课题10余项。

# 降雨入渗下的 宁南山区黄土梯田 稳定性及优化设计研究

田 佳 梁志奇 刘佳丽◎著

# 降雨入渗下的 宁南山区黄土梯田 稳定性及优化设计研究

田 佳 梁志奇 刘佳丽◎著



黄河出版传媒集团  
宁夏人民出版社



## 田 佳

林学博士，2010年毕业于北京林业大学水土保持学院，美国密苏里州立大学访问学者（2015—2016）。现任宁夏大学农学院副教授、研究生导师、林学教研室主任。主要从事水土保持工程方面的研究，在本领域期刊发表论文30余篇，授权专利2项；主持国家自然科学基金2项、宁夏自然科学基金2项、林业厅横向课题1项，参与科研项目或课题10余项。

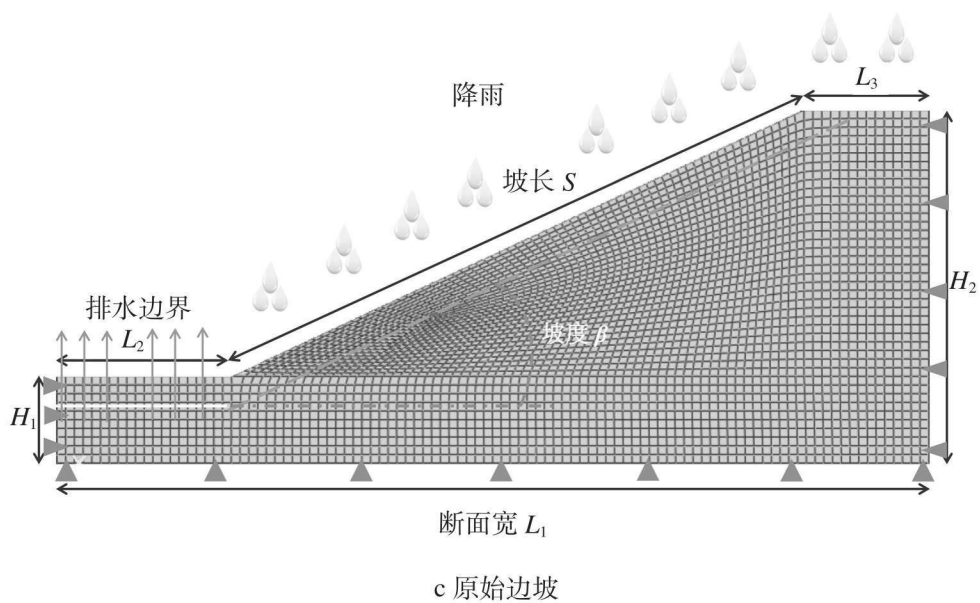


图 3-1 典型边坡模型水平梯田 (a)、隔坡梯田 (b) 和原始边坡 (c)

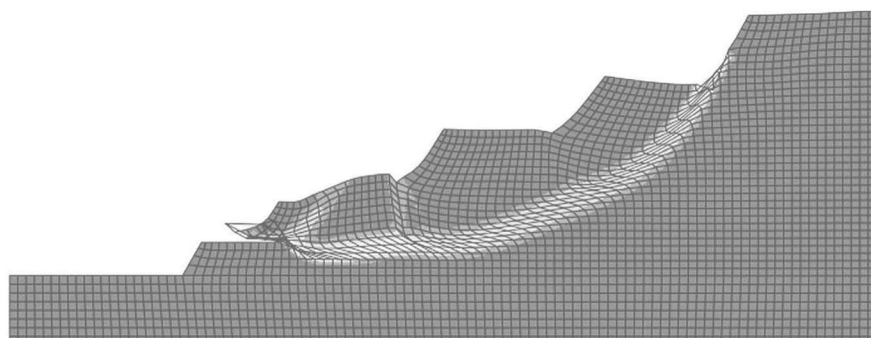


图 4-1 梯田边坡田坎破坏(浅层滑坡)



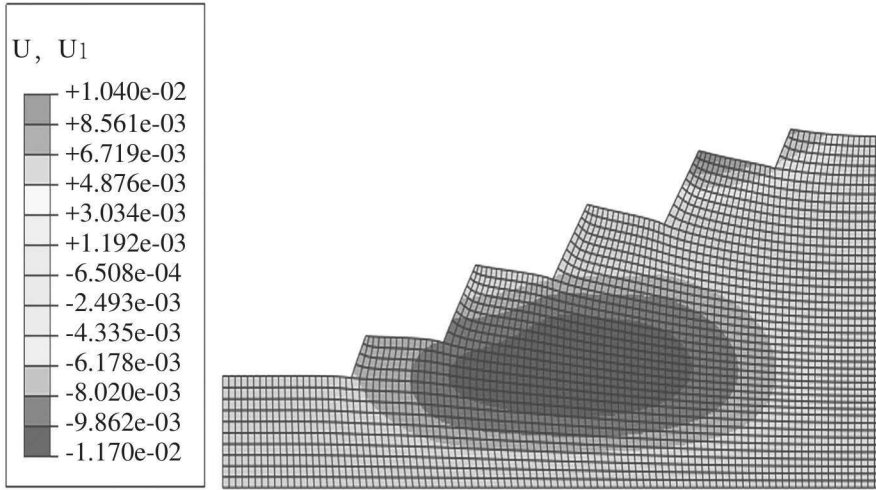


图 6-1 水平梯田位移与降雨入渗历时的变化规律  $T_i=24\text{ h}$  ( a )

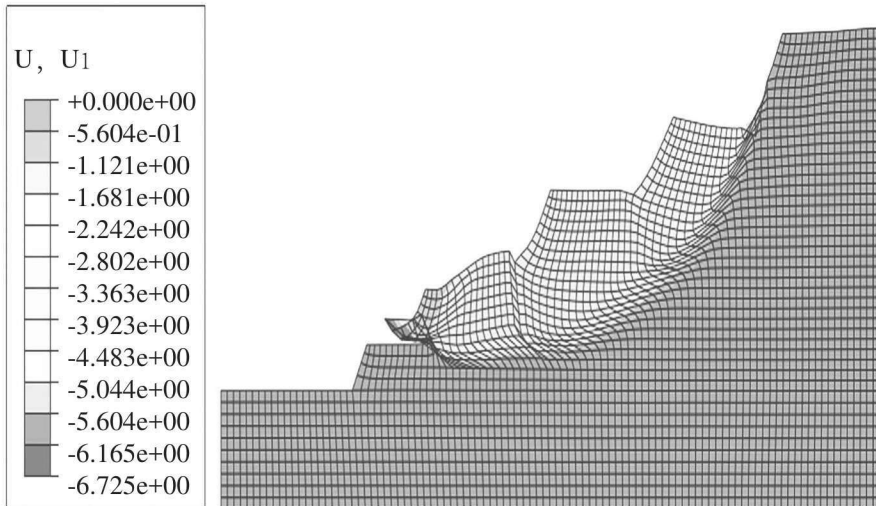


图 6-1 水平梯田位移与降雨入渗历时的变化规律  $T_i=163.4$  ( e )

# 前 言

宁夏南部黄土丘陵区是黄土高原的一部分，属风成堆积黄土，典型特征是颗粒较粗、疏松多孔、力学性质差，缺乏植被时易遭受严重的水力侵蚀。宁南山区历史上由于滥垦、滥伐、滥牧，导致坡耕地水土流失严重，生态环境恶化，居民不断外迁，社会经济发展落后。近年来，宁夏以实现“区域生态系统可持续发展和乡村振兴”为目标，在该地区开展了一系列的坡改梯水土保持工程。梯田工程的建设改变了坡耕地的小地形，减少了地表径流，增加了土壤入渗，从而有效地提高了土壤墒情，为当地减少水土流失和增加粮食产量发挥了重要作用。因此，坡改梯已成为宁南黄土丘陵坡耕地水土流失治理中采用最广泛的水土保持工程措施。

但是，实施坡改梯工程后，原地形地貌改变了，地表径流重新分配，土壤入渗增加，这些因素导致黄土边坡的土力学特性发生明显改变。坡改梯工程特别是反坡梯田虽然明显增加了降雨入渗，但是也会导致土壤抗剪强度的降低，从而增加滑坡的风险。例如2013年7月3日延安地区发生的极端暴雨导致大面积梯田滑坡，给当地农业生产造成了严重损失，并导致43人死亡，直接经济损失高达102.7亿元。统计资料表明，68.5%的黄土滑坡都发生在降雨期间和之后，降雨作为诱发黄土边坡表层滑坡的最主要触发因素已经被人们广为接受。因此，如何在全

球气候变化导致黄土高原极端气候事件频发的情况下保证宁南山区梯田的安全，就成为一个迫切需要研究的问题。降雨是如何触发黄土梯田的滑坡，能不能通过优化黄土梯田的设计增加梯田的稳定性，这些问题的解决必须依靠对降雨入渗下梯田破坏的过程进行深入研究。

为了研究宁南山区实施坡改梯水土保持工程后降雨入渗如何导致黄土梯田滑坡以及如何通过优化黄土梯田的设计增加梯田的稳定性，本研究拟通过现场调研和室内土工试验等方法，获取宁南山区黄土梯田的类型及断面、土壤的力学及渗透等建模参数，在现有非饱和土稳态/瞬态渗流以及渗流/应力耦合有限元分析理论基础上，采用通用有限元软件ABAQUS建立降雨入渗下的宁南山区黄土梯田稳定性分析流固耦合有限元模型。通过对不同类型的梯田模型（如水平梯田、隔坡梯田、反坡梯田、坡耕地等）在降雨入渗条件下的稳定性模拟，研究不同田坎坡度和高度、不同降雨类型和强度、不同田面宽度耦合作用下黄土梯田稳定性的变化规律，探索实施坡改梯工程后导致黄土梯田稳定性改变的主要因素和与梯田断面设计相关的参数，对宁南山区黄土梯田类型及断面尺寸进行优化设计，以增强黄土梯田在极端气候条件下的稳定性。研究结果为揭示降雨入渗对黄土梯田稳定性的影响机理，推进复杂条件下的黄土边坡稳定性数值计算研究，指导宁南山区坡改梯工程的合理设计和施工，防治黄土梯田地质灾害都具有重要的理论和实践意义。

本书采用的研究方法及研究成果，对目前或即将从事梯田边坡稳定性研究和优化设计的科研人员有着很好的借鉴作用和参考价值。

本书写作过程中得到了国内边坡稳定性分析领域多位专家、学者的大力支持和协助，特别感谢北京林业大学的赵廷宁教授、陈丽华教授、及金楠副教授、黄建坤副教授给予的学术支持，也感谢硕士研究

生杨泽康为本书的校对付出的劳动。本书的出版得到了国家自然科学基金地区项目“降雨入渗下的宁南山区黄土梯田稳定性及优化设计研究”(31960330)和“贺兰山水土保持功能乔木根系锚固土壤作用与数值模拟研究”(31560232)的资助,在此对国家基金委表示由衷的感谢。

# 目 录

## CONTENTS

<b>1 研究现状与研究内容</b>	
1.1 国内外研究现状 .....	001
1.2 研究内容 .....	010
<b>2 研究区概况及黄土力学参数试验</b>	
2.1 研究区概况 .....	012
2.2 试验材料 .....	013
2.3 黄土的参数试验 .....	014
2.4 模型参数 .....	021
<b>3 梯田边坡稳定性流固耦合有限元模型的建立</b>	
3.1 数值分析软件 .....	022
3.2 理论基础 .....	024
3.3 降雨条件下黄土梯田边坡稳定性流固耦合有限元模型的 建立 .....	029
<b>4 降雨入渗与梯田边坡破坏时间的关系</b>	
4.1 梯田边坡破坏类型 .....	034

4.2 降雨入渗强度与梯田边坡破坏时间的变化规律及 敏感性分析·····	035
4.3 不同降雨入渗强度和边坡坡度与破坏时间的变化规律及 敏感性分析·····	040
4.4 讨 论·····	044
4.5 小 结·····	045
<b>5 降雨入渗与梯田边坡安全系数的关系</b>	
5.1 梯田边坡安全系数获取方法·····	047
5.2 不同梯田边坡类型的安全系数随降雨入渗历时的 变化规律及敏感性分析·····	054
5.3 相同边坡坡度和梯田边坡类型的安全系数随降雨入渗 历时的变化规律及敏感性分析·····	064
5.4 边坡安全系数随边坡坡度的变化规律及敏感性分析·····	068
5.5 讨 论·····	074
5.6 小 结·····	075
<b>6 降雨入渗与梯田边坡破坏位移的关系</b>	
6.1 梯田边坡破坏时位移获取方法·····	077
6.2 不同梯田边坡类型的位移随降雨入渗历时的变化规律及 敏感性分析·····	080
6.3 相同梯田边坡类型和边坡坡度的位移随降雨入渗历时的 变化规律及敏感性分析·····	087
6.4 边坡位移随边坡坡度的变化规律及敏感性分析·····	094

6.5 讨论 .....	100
6.6 小结 .....	101
<b>7 基于边坡稳定的黄土梯田优化设计</b>	
7.1 梯田设计参数 .....	103
7.2 模型的构建 .....	103
7.3 设计参数敏感性计算 .....	106
7.4 降雨条件下不同类型梯田稳定性比较 .....	107
7.5 水平梯田设计参数的敏感性分析和最优组合 .....	109
7.6 讨论 .....	112
7.7 小结 .....	113
<b>8 研究结论与展望</b>	
8.1 研究结论 .....	115
8.2 不足与展望 .....	116
<b>参考文献</b> .....	118

# 1 研究现状与研究内容

## 1.1 国内外研究现状

### 1.1.1 黄土滑坡研究现状

近年来,由降雨触发的黄土滑坡灾害的发生率越来越高,促使国内外诸多学者开始研究黄土滑坡及其破坏的物质组成、结构构造、诱发因子、变形特点、运动特征、内在机理、稳定性分析、防治措施等<sup>[1-4]</sup>,试图得到降雨过程以及降雨之后一定时间内边坡土体的稳定状态,了解边坡破坏规律,从而建立预测破坏的模型<sup>[5-9]</sup>。本书主要研究宁南山区黄土梯田边坡稳定性的相关问题,从以下几个方面予以归纳。

王德甫等<sup>[10]</sup>使用时间段不同的地形图和影像图,计算出米脂县和安塞县黄土滑塌的面积,这些数据为分析边坡滑塌提供了支持和帮助。曲永新等<sup>[11]</sup>、张永双等<sup>[12]</sup>归纳了道路边坡滑塌的特点,解释了黄土边坡塌陷的内在机理和塌陷特点与滑坡的差别,其中包含滑动变形机理和滑床的分布位置。虽然,降雨入渗导致黄土边坡滑坡的原因很多,但是有关黄土边坡滑坡的降雨临界值的研究少之又少。唐亚明等<sup>[13]</sup>就陕北区域1960—2009年记录的298个黄土滑坡自然灾害使用相关分析和

Logistic 回归等方法, 计算出不同降雨入渗情况下的降雨临界值或预警值。就结果来看, 暴雨、大雨、中雨、小雨都可能导致黄土滑坡, 且临界降雨量处于 0.1-10.0 ~ 50.1-60.0 mm/d 范围内, 得出降雨入渗导致黄土滑坡的原因复杂, 且黄土边坡复杂的地质结构也是影响因素之一。吴玮江等<sup>[14]</sup>分析了季节性冻融过程和边坡整体形变机理。王念秦等<sup>[15]</sup>阐述了冻融型滑坡的成因, 并且建立模型研究其稳定性。同时王念秦<sup>[16]</sup>又通过冻结温度场进行数值模拟, 计算得出坡体地下水浸润线方程, 获得了关于冻结滞水会导致边坡稳定性减少 25 % 的结论。刘小军等<sup>[17]</sup>关于冻融作用如何影响土体强度参数的分析, 总结得出冻融导致土壤颗粒的黏聚力降低, 内摩擦角减小, 对土壤颗粒黏聚力的影响大于对摩擦角的影响的结论; 对于冻融导致的黄土边坡破坏的研究方法不能同降雨一样, 只研究其临界值的区域特征。文宝萍等<sup>[18-19]</sup>、李媛等<sup>[20]</sup>根据对甘肃天水市孟家山黄土层接触面滑坡的分析, 研究得出以“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”为其破坏模式, 让黄土—泥岩滑坡变形模式研究取得了进展, 这种黄土—基岩接触面滑坡的变形破坏模式是否适用于纯黄土滑坡滑塌还未知。王念秦等<sup>[21]</sup>将黄土边坡的渐进变形破坏模式表述为“拉张应力集中区首先出现在坡顶后部一定范围内, 但剪压应力集中区, 不是在坡脚, 而是在坡体中部, 具体位置与坡高和坡率有关, 中部的剪应力集中带将超过土体的峰值强度, 此时, 破坏将发生, 土体抗剪强度将迅速降到残余值。然后, 同样的渐进性破坏过程将随时间而发展, 比如一方面拉张裂缝向下延伸以达到破坏面, 另一方面中部破坏区同时向上、向下延伸, 当达到坡脚部位时, 边坡整体失去稳定性”, 这为黄土滑塌的变形破坏模式作了较为详细的定性阐述。黄土滑坡的变形破坏模式

是形成机理的外在表现和诱发因素的综合反映<sup>[22]</sup>。同样是黄土滑坡,则因为黄土的类型差异(例如黄土—泥岩接触面滑坡与纯黄土滑坡),甚至因为边坡的微地貌的差异(例如高陡边坡与普通边坡),都会让边坡滑坡所产生的变形样式和破坏形态产生非常大的不同;即使黄土类型均为纯黄土的滑坡,也会因为岩性的差异(例如典型黄土与砂黄土),呈现出变化形态破坏特征的差异,也因为砂性黄土滑塌同时具有“滑坡”与“崩塌”两种特性和特点。机理研究的先行者揭示滑坡内在机理的手段是通过滑带土孔隙水压力的发生变化来分析的,在研究的过程中也关注了不同地质条件所产生的控制作用。以后, Hvorslev<sup>[25]</sup>、Haefli<sup>[26]</sup>、Mogensen<sup>[27]</sup>等研究者也对孔隙水压产生了兴趣,开始专心研究孔隙水压与土体强度之间的关系和影响因素。Poulos<sup>[28]</sup>、Sladen<sup>[29]</sup>、Sasitharan<sup>[30]</sup>等研究者将试验从室外转入了室内,展开了许多不同类型的室内试验,更深层次的研究砂土静态液化的条件与边坡滑坡之间的关系;Lade等<sup>[31]</sup>也通过研究总结出关于边坡滑坡静态液化稳定性的相关分析方法;Yamamuro<sup>[32]</sup>通过试验研究总结出粉粒含量与液化特征之间的关系和相互的影响。

Jordi Corominas等<sup>[33]</sup>对Llobregat区域的研究和分析后总结出降雨对边坡滑坡的影响,也总结出它们之间一定存在着关系,如果不去分析降雨前期的情况,当降雨量为30 mm/d的时候,Llobregat地区很大几率会产生滑坡;如果将降雨强度提高更多或者是降雨持续,使得降雨量达到40 mm/d时,Llobregat地区就会发生泥石流;如果降雨更持久致使降雨量为200 mm/d的时候,Llobregat地区的边坡滑坡就会发生。Fredlund<sup>[34]</sup>也在降雨情况而且是暴雨条件下通过有限元法分析土质边坡滑坡,研究分析降雨条件与边坡滑坡时边坡土体内渗流状况和影响稳定性波动的原

因,结果表明,边坡滑坡时稳定性发生极大变化的原因是降雨入渗强度与边坡滑坡体内的基质吸力,发现发生强降雨时,边坡失去稳定性导致滑坡的最关键的因素,是土体的基质吸力持续降低。孙永帅等<sup>[35]</sup>也研究了降雨与滑坡的关系,利用室外试验和室内试验,更完整地研究了降雨对边坡滑坡所产生的影响,总结出导致边坡滑坡最重要的原因是整个降雨过程雨水不断地向土体入渗。陈伟等<sup>[36]</sup>则利用室内试验进行分析和研究,向边坡施加人工降雨的方式,总结出随着降雨历时的延长,边坡的雨水入渗率减弱,直至边坡土体的状态变为稳定时,降雨入渗的持续,让边坡的孔隙水压力增强,边坡的有效应力越来越低,致使边坡失去稳定性导致滑坡发生。

董时俊<sup>[37]</sup>则针对灵台的黄土边坡进行了探索,通过建立相关数值模型,整理分析灵台本地勘探资料,总结出降雨导致黄土边坡滑坡的现象和原因,降雨沿着黄土滑坡表面裂隙持续向内入渗,黄土边坡的孔隙水压力逐渐升高,并且有效应力越来越小,此时降雨会侵蚀黄土边坡的底部,使黄土边坡受到重力作用从而发生滑坡和其他地质灾害。郝付军等<sup>[38]</sup>通过 Geo-studio 软件数值模拟了边坡滑坡的过程,且根据饱和-非饱和理论以及边坡的稳定性理论研究了经过 3 天连续强降雨下湖北武汉某处边坡的滑坡,边坡滑坡时的抗剪强度逐渐降低,并且边坡安全系数也越来越小,最终导致边坡失去稳定性后发生滑坡。唐栋等<sup>[39]</sup>以三峡水库区域砂土和黏土滑坡案例通过非饱和渗流法做了研究和分析,深入探索了前期降雨对砂土和黏土边坡所产生的影响。结果表明砂土边坡受降雨历时比较短且较强的前期降雨影响更大,但是黏土边坡比较容易受降雨历时比较长且较小的前期降雨影响,且影响程度大于砂土边坡受到的影响。