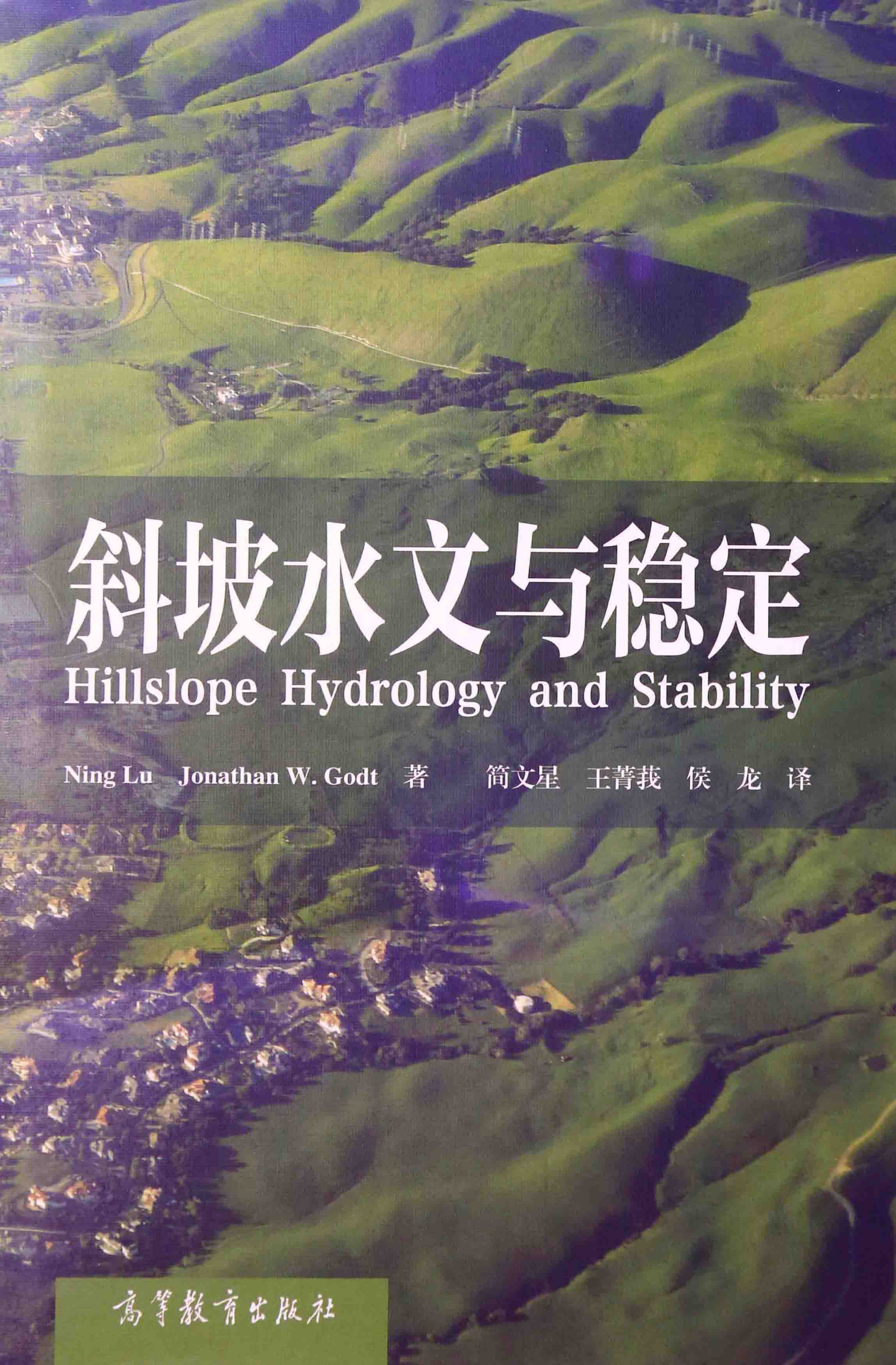


An aerial photograph of a landscape featuring rolling green hills. A river winds through the valley, and a small town or village is visible on the left side. The hills are covered in dense vegetation, and the overall scene is bathed in a warm, golden light, suggesting a sunset or sunrise. The image serves as the background for the book cover.

斜坡水文与稳定

Hillslope Hydrology and Stability

Ning Lu Jonathan W. Godt 著 简文星 王菁莪 侯 龙 译

高等教育出版社

XIEPO SHUIWEN YU WENDING

斜坡水文与稳定

Hillslope Hydrology and Stability

Ning Lu Jonathan W. Godt 著 简文星 王菁莪 侯 龙 译

高等教育出版社·北京

图字：01-2014-2745 号

Hillslope Hydrology and Stability by Ning Lu and Jonathan W. Godt, first published by Cambridge University Press 2013

All rights reserved.

© Ning Lu and USGS (Jonathan Godt's contributions) 2013

图书在版编目 (CIP) 数据

斜坡水文与稳定 / (美) 卢宁, (美) 戈特 (Godt, J. W.) 著; 简文星, 王菁莪, 侯龙译. — 北京: 高等教育出版社, 2014. 7

书名原文: Hillslope hydrology and stability
ISBN 978-7-04-039834-2

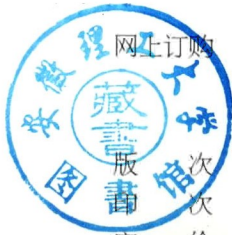
I. ①斜… II. ①卢… ②戈… ③简… ④王…
⑤侯… III. ①斜坡稳定性 IV. ①TU413.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 094948 号

策划编辑	焦建虹 刘占伟	责任编辑	刘占伟	特约编辑	陈 静	封面设计	李卫青
版式设计	童 丹	插图绘制	杜晓丹	责任校对	孟 玲	责任印制	韩 刚

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 涿州市星河印刷有限公司
开 本 787mm × 1092mm 1/16
印 张 28
字 数 550 千字
插 页 7
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
版 次 2014 年 7 月第 1 版
次 2014 年 7 月第 1 次印刷
定 价 99.00 元



本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 39834-00
审 图 号 GS (2014) 1227 号
本书插图系原文插图

译者简介

简文星, 男, 1967 年生, 博士, 教授, 现任职于中国地质大学 (武汉); 系国际工程地质与环境协会会员、国际岩石力学学会会员、中国岩石力学与工程学会会员、国际防灾减灾协会会员; 担任国际期刊《地质环境灾害》编委。

主要研究方向有: (1) 斜坡的稳定性研究, 重点为滑坡的形成机制与预测、防治技术研究; (2) 岩土工程测试技术。

简文星教授多年来围绕长江三峡库区滑坡地质灾害进行科学研究, 先后主持和参与了国家自然科学基金面上项目、三峡库区重大地质灾害防治工程专项等多个科研项目。尤其针对三峡库区复杂成因的滑坡问题, 提出了多学科交叉的研究方法, 从新构造活动、地貌演化过程、降雨诱发作用以及软弱夹层的蠕滑作用等方面揭示了滑坡的形成机制, 取得了丰硕成果。

简文星教授长期从事教学和科研工作, 先后主讲了“土力学”、“滑坡防治”、“岩土工程学”、“工程地质学基础”等多门本科生、研究生课程, 共发表论文 50 余篇, 合著专著 1 部, 合译专著 2 部, 获湖北省科技进步一等奖 1 项 (排名第二)。

作者简介

Ning Lu 美国地质学会、美国土木工程学会会士, 科罗拉多矿业大学土木与环境工程系教授, 过去 10 年的主要研究课题为斜坡水文学与稳定性。Lu 教授是《非饱和土力学》(John Wiley & Sons, 2004) 和本书的第一作者, 在世界知名期刊上发表了大量的有关变饱和多孔介质统一有效应力的论文。因开创性地定义了变饱和土的吸应力函数概念, 他先后获得了美国土木工程学会 Norman Medal 奖和 Cores Medal 奖。

Jonathan W. Godt 美国地质调查局滑坡灾害研究专家, 研究美国和世界范围内的滑坡灾害问题已超过 15 年。他的主要研究方向是通过监测和揭示滑坡形成过程, 建立滑坡灾害评价和预测的方法。他发表了大量的关于滑坡灾害的科研报告、地质图件和期刊论文。

献给

Connie、Vivian、Shemin、Neva 和 Laura

序

即使粗略地浏览一下由 Lu 和 Godt 合著的《斜坡水文与稳定》，也能给大多数对岩土工程和水文学交叉领域感兴趣的专业人员留下深刻的印象。这本独一无二的教材将非饱和带水文学和岩土工程的概念系统地统一到一种全新的水文—地质—力学方法中，着重强调量化水文诱发滑坡的机制。专业人员将会特别欣赏书中广泛的概念，从基本的岩土力学和土的性质的概念，到最前沿的斜坡水文学理论，清楚详细地阐明了土的各向异性、分层、植被的力学特性和水文作用等。作者以最前沿的理论，即滑坡为天然的地形地貌形成过程和山区具有普遍性的自然灾害为线索，将本书的内容有机地结合在一起。

本书论述了在广泛的自然环境中滑坡发生的本质（在典型的技术教材中往往没有涉及这部分内容），其内容既系统又重点突出、浅显易懂，将是学生们非常喜欢的教科书。本书从介绍降雨的瞬态和年际模型、土的类型、滑坡的地貌形态等开始，系统地论述了入渗作用、斜坡水文、水文—力学特性，以及这些因素对斜坡应力状态的综合作用等。本书中的数值模拟实例将帮助学者们清楚地理解书中的基本概念，提高认识相关问题的数量级。每章均配有大量的习题可供读者自学使用。

本书为土水力学这一新兴的边缘学科划分了边界。作者通过变饱和条件下统一有效应力（吸应力）将水文学和土力学密切地联系起来（第 6 章）。作者从新颖且重要、标准教材经常忽略的角度，对水文学与岩土工程领域早已形成的概念进行了重新审视，从而提供了一种独一无二的新视野。例如，斜坡地下水和土层（形成水文界限）的相互作用、突然触发滑坡的临界机制等。在以往的斜坡水力学教材中，很少像本书第 3 章那样定量地探讨这些内容。本书中另外一个整合概念的例子是，量化处理根系加固作用和天然斜坡植被根系的力学作用（第 7 章）。书中关键数值参数的大量信息以及第 9 章和第 10 章中启发性的案例分析，使得本书成为学生、研究学者和工程实践人员等不可多得的参考书。毫无疑问，经过时间的考验，这本包含大量新颖概念的呕心沥血之作一定会变得更加出色。我希望学生和研究者们能在这本关于斜坡水文—力学过程的专著的广度和深度上受到鞭策和启发。

Dani Or 教授
苏黎世联邦理工学院

前言

通过量化斜坡的水文 - 力学过程, 我们力求对降雨诱发型滑坡发生的时空前沿研究进行深入的论述。滑坡是一种普遍的不断塑造地表、地貌的自然现象。从地质历史的角度来看, 滑坡是两种广泛发生的构造运动和侵蚀作用的结果。从人类历史的角度来看, 除了地震外, 构造运动以人类难以察觉的均衡速率在进行。然而, 侵蚀作用却是人类完全能察觉的, 并且大部分侵蚀作用是由降雨导致的。这些动力地质作用的结果形成了千差万别的各种地形: 从平原到丘陵、悬崖峭壁, 甚至人类难以想象的形状。

了解滑坡的发生机理对人类社会和生活环境的安定是至关重要的, 这也使得滑坡成为很多学科, 如地貌学、水文学、地理学、气象学、土壤学、土木和环境工程学等的研究焦点。尽管这些学科处理滑坡问题的视角差别很大, 但它们共同的主线是对滑坡的力学分析。利用力学分析的好处是, 不管地形地貌多么复杂, 决定斜坡稳定与否的是其内部的力学平衡。力学平衡受两个耦合物理过程, 即水文或者地表径流过程与应力平衡过程的控制。

理解和量化水文 - 力学过程, 为不同学科、不同途径预测滑坡发生的空间与时间所需的知识提供了重要的联系。每个斜坡的稳定性由下滑力和抗滑力确定。下滑力主要来自重力, 抗滑力主要由斜坡的材料强度所提供。这种力学平衡受到随着天气、季节或短时间变化的水的影响, 这种影响具有有利稳定或者不利稳定的双重作用。利用变饱和条件下地下水文 - 力学过程的统一有效应力原理, 可量化水对斜坡稳定性的作用。

本书介绍了降雨入渗、有效应力、降雨入渗与有效应力耦合作用的量化处理, 以及它们在斜坡稳定中的作用。第 1 章介绍了滑坡概况、滑坡分类、滑坡的社会经济影响。第 2 章阐述了滑坡发生的斜坡地形、地貌背景。第 3 章与第 4 章分别系统论述了变饱和条件下地下水稳定流与瞬态流过程。第 5 章用线弹性静力学理论量化了斜坡在重力作用下产生的总应力场。第 6 章论述了将土的吸应力和有效应力联系在一起的统一有效应力原理。第 7 章和第 8 章介绍了斜坡材料的性质、土和植物根系的强度以及水文本构关系。第 9 章和第 10 章综合斜坡地貌学、水文学和土力学对斜坡稳定性进行了严谨的计算与分析。其中, 第 9 章系统介绍了经典或者传统的斜

坡稳定性计算与分析方法, 以及通过统一有效应力原理将这些经典的方法应用和拓展到变饱和条件的斜坡中, 第 10 章呈现了脱离传统斜坡稳定性分析方法论, 采用局部吸应力和局部稳定系数方法预测变饱和斜坡由降雨诱发滑坡的空间和时间。书中提出的水文 - 力学模型的有效性通过两个实例得到了检验: 第一个实例分析的是由降雨诱发的一个浅层滑坡, 通过多年的现场监测发现, 由于增加了几千帕的吸应力最终导致了斜坡失稳; 第二个实例是应用水文 - 力学模型分析由于融雪导致的正在连续滑动的深层滑坡。

本书其实是我们共同努力探索和领悟滑坡发生现象的记录。本书所涵盖的资料是从“斜坡水文与稳定”这门课程中累积起来的。这门课程在过去 6 年内, 曾在美国的科罗拉多矿业大学、瑞士的洛桑联邦理工学院、意大利的佩鲁贾大学讲授过。在教学中, 通过与老师和学生们的交流, 我们收获颇丰。本书的主要部分是 Ning Lu 在 2010 年和 2011 年期间作为斯坦福大学 Shimizu 的客座教授与美国地质调查局加利福尼亚州 Menlo Park 分局的访问科学家所撰写的。他的东道主, 斯坦福大学的 Ronaldo Borja 和美国地质调查局的 Brian Collins 为其提供了一个激发灵感、多产成果的环境。同事们对本书的部分原稿提出了精辟的、批评性的、全面的修改建议。这些同事包括: 美国地质调查局的 Rex Baum、Brian Collins、Richard Healy、Richard Iverson、Mark Reid, 美国宇航局 Goddard 太空飞行中心的 Dalia Kirschbaum, 意大利米兰比可卡大学的 Giovanni Crosta, 威斯康星大学麦迪逊主校的 William Likos, 科罗拉多大学博尔德分校的 John McCartney, 瑞士苏黎世联邦理工学院的 Dani Or, 意大利特伦托大学的 Ricardo Rigon, 佩鲁贾大学的 Diana Salciarini, 科罗拉多矿业大学的 Alexandra Wayllace, 以及南卡罗来纳大学哥伦比亚分校的 Raymond Torres。我们特别感谢 Rex Baum 对整本书进行了校对。尽管如此, 书中错误与偏见之处在所难免。Basak Sener-Kaya 为第 5 章的斜坡总应力分布提供了图与表格。最后, 作者感谢 Peter Birkeland 在每部分的开头以艺术形式对作者的思想作了精辟的描述。

相关符号及单位

符号	描述	单位
A	各向等值荷载的 Skempton 孔隙压力参数	—
A_L	滑坡面积	m^2
A	面积、横截面面积	m^2
a_1	根系抗拉强度参数	$\text{MPa}\cdot\text{m}^{-a_2}$
a_2	根系抗拉强度参数	—
B	偏差荷载的 Skempton 孔隙压力参数	—
b	体力向量	N/m^3
b	粒间摩擦角参数	—
b_1	根系抗剪强度参数	MPa
b_2	根系抗剪强度参数	$\text{MPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$
b_n	条分法中第 n 条块的宽度	m
b_o	根系质量随深度的累积速率参数	—
b_i	体力分量	N/m^3
$C(\psi)$	与吸力成函数关系的比水容量	kPa^{-1}
$C(h)$	与水头成函数关系的比水容量	m^{-1}
c	黏聚力	kPa
c	溶质浓度	mol/m^3
c_c	胶质黏结导致的黏聚力	kPa
c_d	诱发或启动滑动面的黏聚力	kPa
c_o	颗粒互锁导致的黏聚力	kPa
c_s	吸应力导致的黏聚力	kPa
c_u	不排水抗剪强度	kPa
c'	有效黏聚力	kPa
D	扩散系数	m^2/s
D_o	空气中自由蒸汽扩散系数	m^2/s
D_r	滑坡体最大深度	m

符号	描述	单位
D_r	相对密度	—
D_v	孔隙介质中自由蒸汽扩散系数	m^2/s
D_v	水蒸气扩散系数	m^2/s
D_{10}	占总质量 10% 的细颗粒直径	m
D_{50}	占总质量 50% 的细颗粒直径	m
d	毛细管直径	m
d	根系直径	mm
d	由黏聚力和摩擦角定义的抗剪强度参数	kPa
$d_1、d_2、d_3$	根系剪切强度增长参数	kPa
d_4	根系剪切强度增长参数	a^{-1}
d_5	根系剪切强度衰减参数	a^{-d_5}
d_6	根系剪切强度衰减参数	a^{-d_6}
E	弹性模量, 也称杨氏模量	kPa
E	条分法中条块间的法向力	kN
e	孔隙比	—
$e_{\max}$	最松散状态时的孔隙比	—
$e_{\min}$	最密实状态时的孔隙比	—
e_s	饱和蒸汽压	hPa
FS	斜坡稳定系数	—
FS_s	基于抗剪强度的稳定系数	—
f	入渗量	cm/h
$f(u_a - u_w), f(S)$	吸应力特征函数	kPa
f_c	最小稳定入渗常数	cm/h
f_0	初始入渗量	cm/h
F_{ij}	分力	N
G	切变模量或剪切模量	kPa
G_s	土粒相对密度	—
g	重力加速度	m/s^2
$\mathbf{g}$	重力加速度矢量	m/s^2
H	Kirchhoff 积分变换	m^2/s
$H_{\max}$	有限斜坡的最大坡高	m
H_{ss}	地面到滑动面的深度	m
H_{wt}	地面到潜水面的深度	m

符号	描述	单位
h	毛细上升高度, 水头	m
h_a	进气水头	m
h_c	最大毛细上升高度	m
h_d	施加的基质吸力水头增量	m
h_g	总重力水头	m
h_i	土柱中的初始吸力水头	m
h_m	基质吸力水头	m
h_n	第 n 条块滑动面到潜水面的高度	m
h_o	湿润锋上的吸力水头	m
h_o	渗透吸力水头	m
h_t	总水头	m
h_{vap}	水蒸气的位势水头	m
h_v	动力水头或速度水头	m
h_w	时间的基质吸应力减量	m
$I_{1\sigma}$	第一应力不变量	kPa
i	水力梯度	—
i	滑动面的初始根系方向	°
$i、j、m、s$	系列指数	—
K	体积模量	kPa
K	渗透系数	m/s
K	渗透系数张量	m/s
K^*	拉普拉斯空间中的量纲一渗透系数	—
K_f	与渗透性相关的人渗常量	h^{-1}
K_o	湿润锋的渗透系数	m/s
K_o	无水平位移条件的水平与垂直应力比	—
K_{eq}	土 - 高进气值陶瓷系统的等效渗透系数	m/s
K_s	饱和渗透系数	m/s
K_{sat}	饱和渗透系数	m/s
K_s^d	干燥状态下的饱和渗透系数	m/s
K_s^w	湿润状态下的饱和渗透系数	m/s
K_s^c	高进气值陶瓷的饱和渗透系数	m/s
$K_x、K_y、K_z$	$x、y、z$ 方向上的渗透系数	m/s
L	毛细隔离带的导流宽度	m

符号	描述	单位
L	土层厚度	m
L	无限斜坡中的土体宽度	m
L	潜水面到地面的深度	m
L_r	滑坡滑动面的长度	m
l	样品高度与高进气值陶瓷厚度之和	m
$l_1、l_s$	样品高度	m
$l_2、l_c$	高进气值陶瓷的厚度	m
l_n	第 n 条块的底边长度	m
M	由内摩擦角定义的抗剪强度参数	—
M_r	深度为 z 时的累积质量	—
m	条分法中的总条块数	—
m	与有限斜坡稳定性评价相关的斜坡稳定参数	—
m_r	单位体积加筋土的根系质量	kg/m ³
m_s	固体质量	kg
N	指数变量	—
N	法向力	N
N_n	法向反作用力	N
n	1954 年 Corey 渗透系数模型参数	—
n	孔隙率	—
n	土 - 水特征曲线模型常数	—
n^d	干燥状态下土 - 水特征曲线模型常数	—
n^w	湿润状态下土 - 水特征曲线模型常数	—
n	系列指数	—
$\mathbf{n}$	边界上单位方向矢量	—
$n_x、n_y、n_z$	边界上单位方向矢量分量	—
n_a	气体填充孔隙率	%
n_p	孔隙率	—
P	年降雨量	mm
PET	潜在年蒸发量	mm
p	滑坡概率密度	m ⁻²
Q	量纲一的流动变量	—
Q	毛细隔离带的导流能力	m ² /s
Q	总降入渗量	m

符号	描述	单位
q	液体流速	m/s
$\hat{q}_d(l, t)$	干燥过程中的模拟流速	m/s
$\hat{q}_d^{\text{exp}}(l, t)$	干燥过程中的实验流速	m/s
$\hat{q}_w(l, t)$	湿润过程中的模拟流速	m/s
$\hat{q}_w^{\text{exp}}(l, t)$	湿润过程中的实验流速	m/s
q_{in}	单元体水的流入总速度	kg/s
q_{out}	单元体水的流出总速度	kg/s
q_v	蒸汽流速	m/s
$\mathbf{q}$	液体流速矢量	m/s
R	通用气体常数	J/(mol·K)
R	莫尔圆半径	kPa
R	合力	N
RDD	相对干密度	—
$R_{\max}$	最大合力	N
R_r	根系抗剪强度的转换因子	—
REV	代表性单元体积	m ³
r	圆形滑动面的半径	m
r	等效或平均孔隙半径	μm
r_u	无限斜坡模型中孔隙水压力参数	—
S	饱和度	%
S	横截面积	m ²
S_{xy}	垂直于 z 轴的横截面积	m ²
S_{xz}	垂直于 y 轴的横截面积	m ²
S_{yz}	垂直于 x 轴的横截面积	m ²
S	剪力	N
$S_{\max}$	最大剪力	N
S_e	有效饱和度	%
S_n	第 n 条块底边的启动剪切阻力	N
S_r	残余饱和度	%
S_s	单位储水量	m ⁻¹
s	吸水系数	m/s ^{1/2}
T	热力学温度	K
T	量纲一的时间	—

符号	描述	单位
T_s	表面张力	N/m
t	时间	s
t_x	边界 x 方向上的牵引力或应力分量	Pa
t_y	边界 y 方向上的牵引力或应力分量	Pa
t_z	边界 z 方向上的牵引力或应力分量	Pa
u	孔隙水压力	kPa
$u_x、u_y、u_z$	位移分量	m
$\bar{u}_x、\bar{u}_y、\bar{u}_z$	边界上的位移分量	m
u_a	孔隙气压力, 气压	kPa
u_b	进气 (气泡) 压力	kPa
u_c	各向等值应力荷载导致的孔隙压力	kPa
u_d	各向不等值应力荷载导致的孔隙压力	kPa
u_{ij}	位移分量	m
u_{sat}	饱和蒸汽压	kPa
u_{v0}	饱和蒸汽压	kPa
u_w	孔隙水压力, 水压力	kPa
$(u_a - u_w)$	基质吸力	kPa
V	滑坡体体积	m^3
V_t	土样体积	m^3
v	排出速度	m/s
v_v	代表性单元中空隙的体积	m^3
v_s	代表性单元中固体的体积	m^3
v_w	代表性单元中水的体积	m^3
v_w	水的摩尔体积	m^3/mol
W	有效应力做的虚功	J
W	土体重量	N
W_n	第 n 条块的重量	N
W_σ^s	吸应力做的虚功	J
W_v	单位横截面积土柱的重量	N/ m^2
X	滑带沿滑动面的最大位移	m
X	条分法中条块间的剪力	kN
$x、y、z$	笛卡儿直角坐标系的坐标	m
$x_*、z_*$	笛卡儿直角坐标系中斜坡倾斜方向	m

符号	描述	单位
Z	量纲一的距离	—
Z	湿润距离	m
Z	滑动带厚度	m
z_w	松动带或风化带厚度	m
α	莫尔圆旋转角	°
α	局部地形坡度	—
α	孔径分布指数, 土 - 水特征曲线模型常数	kPa ⁻¹
α^d	干燥状态时的孔径分布指数	kPa ⁻¹
α^w	湿润状态时的孔径分布指数	kPa ⁻¹
α_n	第 n 条块的底边倾斜角度	°
α_s	土的体积压缩系数	m ² /N
β	莫尔圆旋转角	°
β	滑动面与水平方向的夹角	°
β	孔径分布指数, 土 - 水特征曲线模型常数	m ⁻¹
β_w	水的压缩系数	m ² /N
χ	基质吸力系数	—
$\chi(u_a - u_w)$	吸应力 (毛细应力)	kPa
ε	应变	%
ε_x 、 ε_{xy}	应变分量	%
ϕ	内摩擦角	°
ϕ	毛细隔离带倾角	°
ϕ_c	颗粒间摩擦角	°
ϕ_d	干燥状态时的内摩擦角	°
ϕ_0 、 ϕ_{100}	相对密度为 0 和 100 时的内摩擦角	°
ϕ'	有效内摩擦角	°
ϕ'_d	诱发或启动的有效摩擦角	°
ϕ_{CU}	固结不排水条件下的摩擦角	°
ϕ'_{NC}	正常固结条件下的有效摩擦角	°
ϕ'_{OC}	超固结条件下的有效摩擦角	°
γ	容重	kN/m ³
$\gamma_{d\max}$ 、 $\gamma_{d\min}$	最大或最小干容重	kN/m ³
γ	坡角	°
γ_{xy}	扭转角应变分量	rad

符号	描述	单位
γ_w	水的容重	kN/m^3
Λ_n	K^* 的伪特征周期方程的第 n 个正解	—
λ	蒸汽化潜热	J/kg
λ	与土的容重相关的斜坡稳定性参数	—
λ	Boltzmann 转换变量	—
λ	拉梅弹性常数	kPa
δ_{ij}	等值张量	—
ν	泊松比	—
μ_t	总化学势能	J/kg
μ_0	参考状态的化学势能	J/kg
μ_v	水蒸气的化学势能	J/kg
π	渗透压	kPa
Θ	有效含水量 (有效饱和度)	%
θ	体积含水量	%
θ	启动摩擦角	°
θ	初始根系方向的剪切变形角	°
θ	最大启动摩擦角	°
θ	水平方向潜在滑动面的角度	°
θ_1	单元 Δx 的变形角	rad
θ_2	单元 Δy 的变形角	rad
θ_{cr}	潜在滑动面的临界角	°
θ_r	残余体积含水量	%
θ_r^d	干燥状态时的残余体积含水量	%
θ_r^w	湿润状态时的残余体积含水量	%
θ_s	饱和体积含水量	%
θ_s^d	干燥状态时的饱和体积含水量	%
θ_s^w	湿润状态时的饱和体积含水量	%
θ_i	初始体积含水量	%
θ_o	湿润锋的体积含水量	%
ρ_v	水蒸气密度 (绝对湿度)	kg/m^3
ρ_w	水的密度	kg/m^3
σ	总法向应力	kPa
σ_o	法向应力	kPa