

台风作用下植被对边坡稳定性的影响机制研究

庄宇, 邢爱国

Impacts of trees on slope stability during typhoons

ZHUANG Yu and XING Aiguo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202412021>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

乔灌木对台风暴雨型滑坡稳定性影响

Influence of trees and shrubs on the stability of landslides induced by typhoon rainstorm

于鑫, 聂闻, 简文彬, 谢伟, 芦松, 叶春阳 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(1): 17-29

台风暴雨型滑坡滞后效应分析

Analysis on lag effect of typhoon-induced landslide: A case study of typhoon "Lekima" in Qingtian County, Zhejiang Province

栗倩倩, 王伟, 黄亮, 柴波, 高乐 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(6): 10-19

基于不同方法的江苏镇江地区下蜀土边坡稳定性分析与评价

Evaluation of Xiashu loess slope stability in Zhenjiang area using different methods

瞿婧晶, 陆燕, 吴曙亮, 刘健, 苟富刚 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 35-42

基于台风路径追踪的滑坡概率分析

Probability analysis of landslide based on typhoon track

林若昂, 简文彬, 聂闻 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(4): 18-27

降雨矿震叠加作用下抚顺西露天矿边坡稳定性分析

Analysis on the slope stability of Fushun West Open-pit Mine under superimposed action of rainfall, mine and earthquake

刘向峰, 郭子钰, 王来贵, 高晗 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 40-46

基于Mein-Larson入渗模型的凹形边坡稳定性分析

Stability analysis of concave slope based on Mein-Larson infiltration model

胡庆, 吴益平, 苗发盛, 张龙飞, 李麟玮 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 26-35



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202412021

庄宇, 邢爱国. 台风作用下植被对边坡稳定性的影响机制研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(2): 87-95.

ZHUANG Yu, XING Aiguo. Impacts of trees on slope stability during typhoons[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(2): 87-95.

台风作用下植被对边坡稳定性的影响机制研究

庄宇^{1,2}, 邢爱国¹

(1. 上海交通大学海洋工程国家重点实验室, 上海 200240;

2. 湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:我国东南沿海地区台风暴雨型滑坡多发于植被覆盖边坡, 坡面乔木植被发育、整体覆盖度高, 探究台风作用下植被对边坡稳定性的影响机制对开展边坡稳定性分析和风险评价具有重要意义。文章选取典型台风触发浅层滑坡灾害点开挖剖面, 统计分析植被根系发育规律, 结合室内土工试验和现场染色示踪试验, 明确了根系对土体物理力学性质和渗透特性的影响。研究表明: 边坡覆盖的马尾松乔木植被以大直径粗根系为主, 主根系发育深度可达 2 m, 根系在提供附加黏聚力加固边坡的同时, 利用根-土间隙提供优势渗流通道, 加速雨水入渗, 林下边坡优势渗流所占比重可达坡面均匀入渗的 2~3 倍。植被根系力学加筋机制和根-土间隙优势渗流效应促使根系最大发育深度处存在力学和渗透特性差异, 进而演化为潜在滑面。台风期间, 在强风荷载、降雨优势入渗和植被联合作用下, 易沿根系最大发育深度和边坡内部土-岩基覆界面诱发滑坡灾害。研究成果可为东南沿海地区台风暴雨型滑坡灾害风险评价提供依据。

关键词: 台风暴雨型滑坡; 植被覆盖边坡; 根系力学加筋; 优势渗流效应

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2025)02-0087-09

Impacts of trees on slope stability during typhoons

ZHUANG Yu^{1,2}, XING Aiguo¹

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: Typhoon-induced landslides in southeast coastal China are clustered in trees-covered slopes, suggesting potential interactions between trees and slope stability. Investigate the impacts of trees is crucial for slope stability analysis during typhoons. With this purpose, we conduct field tests, laboratory tests and dye tracer tests to investigate the root distribution and impacts of roots on soil properties. Results indicate that trees covered on slopes have a taproot system with a maximum rooting depth of 2 m. Tree roots enhance slope stability by providing additional cohesion to the soil but simultaneously create preferential flow paths that facilitate rapid rainwater infiltration. The contribution of preferential flow arising from root-soil gaps reaches 2 to 3 times greater than uniform shallow infiltration. These dual effects of root reinforcement and preferential infiltration significantly alter the mechanical and hydrological properties of the soil at the maximum rooting depth. During a typhoon event, the strong wind load, rainfall infiltration and trees jointly trigger landslides. The maximum rooting depth and

收稿日期: 2025-03-04; 修订日期: 2025-03-25

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(4217071410); 国家重点研发计划项目(2024YFC3012600; 2024YFC3012602)

第一作者: 庄宇(1996—), 男, 江苏南京人, 土木工程专业, 博士, 助理教授, 从事地质灾害防灾减灾研究。

E-mail: zhuangyu@hnu.edu.cn

通讯作者: 邢爱国(1971—), 男, 陕西咸阳人, 道路与铁道工程专业, 博士, 研究员, 从事地质灾害防治和环境岩土工程研究。

E-mail: xingaiquo@sjtu.edu.cn

bed-soil interface are two potential sliding surfaces within the slope. Our works provide new insights into the risk assessment of typhoon-induced landslides.

Keywords: typhoon-induced landslide; trees-covered slope; root reinforcement; preferential infiltration

0 引言

受全球气候变暖影响,极端天气气候事件强度不断增大,百年或数十年一遇超强台风灾害频发^[1-2]。据资料统计,全球范围内每年由台风造成的经济损失高达 260 亿美元,台风灾害已成为沿海地区危害最严重的自然灾害之一^[3]。

我国东南沿海地区是台风灾害高发区,台风登陆时,风荷载及裹挟的强降雨常在沿海地区触发大量滑坡灾害,造成重大人员伤亡和财产损失。例如:2004 年第 14 号“云娜”台风在浙江省乐清市引发了 21 处滑坡、泥石流地质灾害,造成 42 人死亡、288 间房屋被摧毁^[4];2019 年 8 月,台风“利奇马”以超强姿态登陆浙江,向北席卷期间,对全国 11 个省份造成影响,并于浙江、福建等地诱发大量地质灾害,共造成 1 402 万人受灾,直接经济损失超过 500 亿元^[5]。其中,浙江省永嘉县岩坦镇于 8 月 10 日突发山体滑坡,约 $12 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的滑坡体倾泻而下并形成堰塞湖,摧毁了山早村部分房屋,造成 29 人死亡、3 人失踪^[6]。

目前,国内外学者已通过数值仿真、物理模型试验以及现场调查等方式探究了台风暴雨型浅层滑坡触发机理^[7-11]。然而上述研究多将其视作降雨型滑坡开展分析,仅考虑了坡面均匀入渗带来的影响。我国东南沿海地区台风引发的滑坡灾害多为浅层土质滑坡,坡面乔木植被发育、整体覆盖度较高^[12-15]。乔木植被利用其硕大的迎风面积可将风荷载传递至边坡,同时植被根系通过力学加筋和提供优势渗流通道等方式对边坡稳定性产生影响^[16-17]。孔维伟等^[18]通过风扇等工具模拟风荷载,设计开展模型试验,发现台风期间强风荷载对边坡稳定性有显著影响。Forrer 等^[19]、Schwarzel 等^[20]、张家明等^[21]开展了染色示踪试验,指出植被根系能通过生物、力学作用加剧土体大孔隙的发育,进而提高土体渗透性能。在此基础上,一些学者^[14,22-23]通过数值仿真探究了植被优势渗流和蒸腾等水力作用对边坡稳定性的影响。Zhuang 等^[15,24]在现场调查的基础上,基于极限平衡理论和有限元分析,首次探究了台风-降雨-植被综合作用下边坡稳定性分析,指出台风期间发生的浅层土质滑坡是在强风荷载、降雨优势入渗和植被综合作用下触发的。

由此可见,植被对边坡稳定性的影响是复杂且多方面的。台风期间,植被以根系为纽带与边坡土体产生作用,探究植被根系对边坡稳定性的影响对分析台风暴雨型浅层滑坡失稳机理具有重要意义。当前,针对台风期间植被根系力学和水文作用对边坡稳定性影响的试验分析仍十分欠缺。因此,本文选取了典型台风暴雨型浅层滑坡灾害点开挖剖面,统计分析了植被根系空间发育规律,结合室内土工试验明确加筋土物理力学性质和渗透特性变化,并进行现场染色示踪试验,观察林下边坡雨水优势渗流路径构成及发育特征,研究成果将助力于明确台风暴雨型浅层滑坡失稳机理和沿海地区植被覆盖边坡滑坡灾害风险评价。

1 根系发育特征及根系土物理力学性质

我国东南沿海地区台风暴雨型滑坡灾害多为浅层土质滑坡,坡面植被覆盖度高,集中发生于台风暴雨峰值阶段。现场调查结果表明,研究区台风暴雨型滑坡滑动面多孕育于土-岩基覆界面和土层内部软弱面^[14-15,25]。本文于福建省南平市松溪县选取一典型台风暴雨型浅层滑坡灾害点开展试验分析。边坡具有典型的二元结构,即上覆第四系残坡积土,下伏基岩,基岩埋深为 2.5~3.0 m,滑坡发生于土-岩界面。该台风暴雨型滑坡灾害发生于路边,失稳后,应急部门迅速清除了滑坡堆积,并对边坡进行了削坡处理,削坡后后缘暴露长度 14.6 m。通过对滑坡后缘开挖垂直剖面,统计分析植被根系发育特征,并采样开展室内土工试验,获取了根系对土体物理力学性质的影响。

1.1 植被根系发育特征统计

该边坡植被覆盖类型为马尾松,是研究区台风暴雨型滑坡所在边坡主要乔木植被覆盖类型^[12,15],马尾松高度约 20 m,胸径 25~30 cm。边坡后缘处共分布有 3 棵马尾松,自图 1 左向右分别记作树 1、树 2 和树 3。此外,边坡自左向右 7~8 m 处暴露有残留根系,为滑坡发生后乔木植被残留根系。

对滑坡后缘进行削坡平整后开挖竖向剖面,竖向开挖深度 2 m,直至达到根系最大发育深度处。边坡开挖完成后,采用塑料条带对竖向剖面进行网格划分,网格尺寸为 20 cm×20 cm,共得到 730 个网格。采用游标卡尺测量统计每个网格内根系数量和直径,边坡竖向剖面

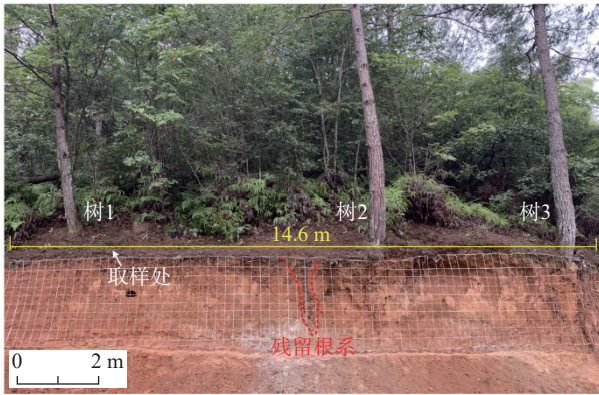


图1 边坡竖向剖面及网格划分

Fig. 1 Vertical profile of the slope and mesh division

网格划分如图1所示。

根据 Leung 等^[26]和 Jotisanjasa 等^[27], 本章节采用单位面积内根系数量(RND)和单位面积内根系截面积(RAD)描述植被根系空间发育特征:

$$RND = \frac{n}{A_s} \quad (1)$$

式中: n ——单个网格内根系数量/根;

A_s ——单个网格面积($20 \times 20 = 400 \text{ cm}^2$)。

$$RAD = \frac{A_r}{A_s} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\pi d_i^2}{4}}{A_s} \quad (2)$$

式中: d_i ——第 i 根根系直径/mm;

A_r ——单个网格内根系总截面积/ mm^2 。

1.2 根系土物理力学性质测量

剖面内根系发育特征统计完成后, 于植被旁开展环刀采样为后续土工试验做准备(取样位置见图1)。环刀直径 50.46 mm、高 50 mm, 采样深度为地面以下 0~2 m, 自地面向下以 20 cm 为间隔分层开挖, 并采用取土钻取样, 确保采样深度大于根系最大发育深度, 即采取试样中包含无根系土和根系土。根系土试样如图2所示。按照《公路土工试验规程》(JTG3430—2020), 分别测量土体颗粒比重、干密度、孔隙率、抗剪强度指标和渗透系数。

土粒比重(G_s)采用比重瓶法测量, 试样干密度(ρ_d)通过烘干法测量:

$$\rho_d = \frac{m}{V} \quad (3)$$

式中: m ——试样烘干后质量/g;

V ——试样体积/ cm^3 。

测量根系土孔隙率时要考虑根系影响, 根系土孔隙率(n)可定义为^[27]:



图2 环刀法获取未经削平的原状根系土样

Fig. 2 Undisturbed root-soil samples arising from ring knife method

$$n_1 = \frac{V_v}{V} = \frac{V - V_s - V_r}{V} = \frac{V - \frac{W_s}{G_s \gamma_w} - \frac{W_r}{G_r \gamma_w}}{V} \quad (4)$$

式中: V_v ——孔隙体积/ cm^3 ;

V_s ——土颗粒体积/ cm^3 ;

V_r ——根系体积/ cm^3 ;

W_s ——土颗粒质量/g;

G_s ——土颗粒比重;

W_r ——根系质量/g;

G_r ——根系比重;

γ_w ——水比重/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ 。

无根系土孔隙率定义为:

$$n_2 = \frac{V_v}{V} = \frac{V - V_s}{V} = \frac{V - \frac{W_s}{G_s \gamma_w}}{V} \quad (5)$$

考虑到台风暴雨型滑坡失稳时土体多处于饱和状态, 因此制备饱和土样开展直剪试验(慢剪), 剪切速率为 0.01 mm/min, 基于摩尔-库伦准则得到土体抗剪强度指标:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (6)$$

式中: τ ——试样抗剪强度/kPa;

c ——黏聚力/kPa;

φ ——内摩擦角/ $(^\circ)$;

σ ——法向应力/kPa。

对现场环刀法获取的原状试样开展饱和渗透试验, 以测量根系土与无根系土渗透特性差异。考虑到研究区残坡积土多为黏性土, 因此采用变水头渗透实验测量饱和渗透系数:

$$K_s = 2.3 \frac{aL}{At} \lg \frac{H_1}{H_2} \quad (7)$$

式中: K_s ——试样饱和渗透系数/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$;

a ——变水头管截面积/ m^2 ;

L ——试样高度/ m ;

A ——试样截面积/ m^2 ;

t ——渗透时间/ s ;

H_1 ——初始水头/ m ;

H_2 ——终止水头/ m 。

1.3 试验结果分析

(1) 根系空间分布特征

植被根系空间分布统计结果见图 3。共统计有植被根系 1 409 根, 最大根系发育深度达地面以下 2 m, 单个网格内最大根系数量为 16 根($RND=400$ 根/ m^2), 位于地表以下 0 ~ 0.2 m 深度范围, 见图 3(a)。

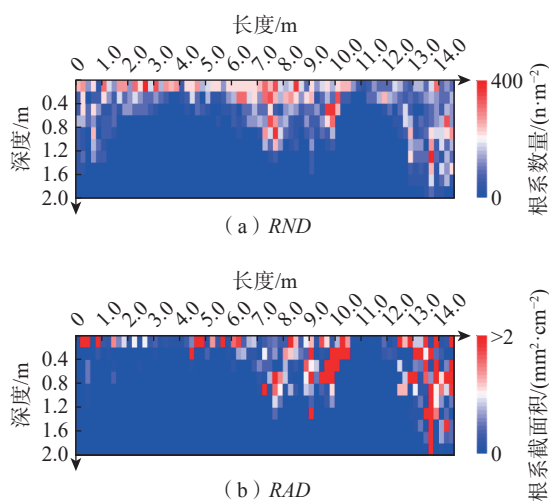


图 3 植被根系空间发育特征

Fig. 3 Distribution of roots in the profile

从根系竖向分布看, 地面以下 0.2 m 深度内, 根系分布较为均匀, 整个剖面内均有大量根系发育; 地面 0.2 ~ 0.4 m 深度内表现出相似的发育特征, 仍可在整个剖面内观察到大量根系; 0.4 m 深度以下, 大量网格为无根区。由此推断, 地面以下 0.4 m 深度内, 植被根系由马尾松乔木植被和草本植物提供, 草本植物根系在浅表层分布相对均匀, 但影响深度较浅。0.4 m 深度以下植被根系主要由马尾松提供。

从水平分布来看, 边坡内部根系集中于乔木植被附近。地面 0.6 m 深度以下, 仅在乔木植被旁观察到根系存在, 最大根系发育深度位于第三棵马尾松处。由于该马尾松紧贴开挖剖面, 主根系和侧根系均有暴露在外, 因此该处网格揭露了植被根系最大发育深度和发育形式。相比于典型须根系植被, 侧向根系相对不发育, 是典型的具有主根的深根乔木植被^[12, 15], 竖向发育深度远大于草本植物, 因此对边坡稳定性有重要影响。

植被根系截面积(RAD)空间分布如图 3(b)所示。 RAD 较大处主要集中于 3 棵马尾松和摧毁植被残留根系附近, 并随着埋藏深度的增大呈现降低趋势。浅表层草本植物多具有须根系, 发育深度浅且根系直径小, 因此根系截面积十分有限。对于乔木植被而言, 第三棵马尾松处(树 3, 边坡剖面最右侧)由于植被主根系暴露于开挖剖面, 因此观察到贯穿竖向剖面的高 RAD 区域。

开挖剖面内不同直径根系数量和截面积 RAD 随深度变化如图 4 所示。根据 Camire 等^[28]和宋尊荣等^[29], 将根系划分为细根(0 ~ 2 mm)、小根(2 ~ 5 mm)、中根(5 ~ 10 mm)和粗根(>10 mm)。结果表明: 植被根系数量和截面积随深度增大均显著降低。地面以下 0.2 m 深度内根系数量最大, 共计 437 根, 0.2 ~ 0.4 m 深度内根系数量 302 根, 1.0 m 深度以下降低至 100 根以内。尽管开挖剖面内植被根系以细根和小根为主, 中根和粗根所占比例于 0.4 m 深度以下开始上升, 这是由于 0.4 m 深度以下发育根系主要源自于马尾松乔木植被, 与图 3 中根系分布特征较为吻合。不同直径根系截面积随深度变化与根系数量变化规律相似。地表以下 0.2 m 深

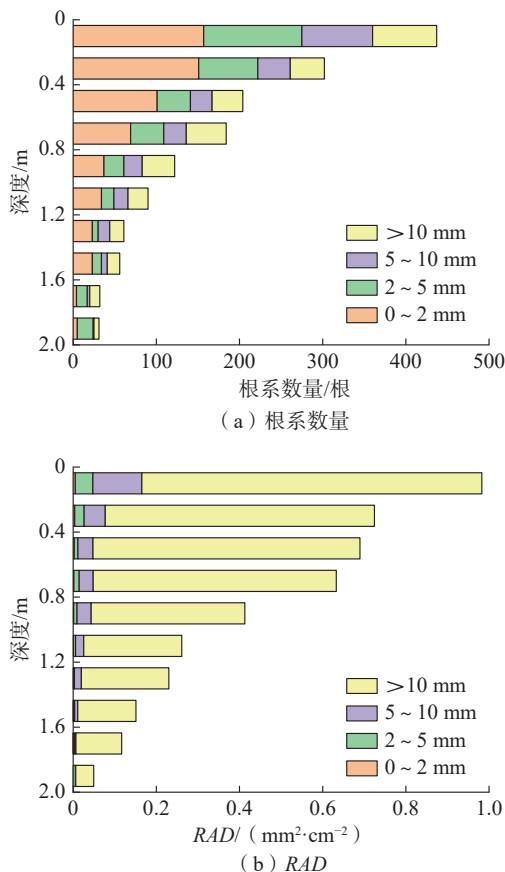


图 4 不同直径根系数量和截面积随深度变化

Fig. 4 Vertical distribution of roots in different classes

度内根系面积最大,约 $1.0 \text{ mm}^2/\text{cm}^2$,而 $1.8 \sim 2.0 \text{ m}$ 深度范围根系密度降低至 $0.04 \text{ mm}^2/\text{cm}^2$ 。对比分析图 4(a)(b),发现尽管边坡内部植被根系以细根和小根为主,但上述两种根系对截面积贡献极为微弱,粗根在不同深度处截面积占比均超过 80%,考虑到植被附加黏聚力与根系直径呈幂律关系^[30],且草本植物根系发育于地面以下 0.4 m 深度内,因此认为边坡内部植被根系力学加筋机制主要源自于马尾松乔木植被,且马尾松主要通过大直径粗根加固边坡。

(2) 根系土物理性质

试样物理性质试验结果如图 5 所示,取样点根系最大发育深度约 0.8 m 。根据图 5a,不同深度处试样土体颗粒比重(G_s)为 $2.65 \sim 2.68$,表现出较高的一致性,不同深度处试验土样类别均为粉质黏土,边坡内部土质分布较为均匀。试样干密度(ρ_d)和孔隙率(n)测量结果如图 5b 和 c 所示,两者表现出相反的变化趋势,并在地面以下 0.8 m (根系最大深度)处观察到土体性质突变点。地面以下 $0 \sim 0.8 \text{ m}$ 深度内,根系土干重度和孔隙率

分别为 $12.8 \sim 13.1 \text{ kN/m}^3$ 和 $49.7\% \sim 50.9\%$ 。 0.8 m 深度以下,无根土干重度和孔隙率分别为 $13.5 \sim 14.5 \text{ kN/m}^3$ 和 $44.7\% \sim 47.6\%$ 。上述变化规律反映了根系对土体物理性质的影响,相较于土颗粒,植被根系材料密度低,在生物力学作用下根土间存在间隙。因此,浅层根系土表现出更低的干密度和更高的孔隙率。

(3) 根系土强度及渗透性

不同深度处试样抗剪强度指标和饱和渗透系数试验结果如图 5d—f 所示。不同深度处土体内摩擦角为 $18.5^\circ \sim 23.3^\circ$,在深度范围内分布较为一致,随埋深增大、土体密实度提高呈略微增大趋势。然而,土体黏聚力变化显著,于根系最大深度处(地面以下 0.8 m)发生突变。加筋区土体黏聚力为 $7.5 \sim 10.6 \text{ kN}$, 0.8 m 深度以下无根土黏聚力仅 $4.6 \sim 6.0 \text{ kN}$ 。若将无根土平均黏聚力 5.3 kN 设为基准,可反推得到表层 0.8 m 深度内植被根系提供的附加黏聚力为 $2.2 \sim 5.3 \text{ kN}$,该附加黏聚力可显著提高边坡表层土体抗剪强度。抗剪强度试验结果表明:植被根系加筋机制主要通过提供附加黏聚力提高土体抗剪强度和加固边坡,对土体内摩擦角影响相对较小,与国内外学者试验结果相一致^[30-31]。

试样饱和渗透系数试验结果如图 5f 所示,不同深度土体饱和渗透系数为 $2.9 \times 10^{-6} \sim 5.2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$,随深度增大显著降低。其中,地面以下 0.8 m 深度范围内根系土饱和渗透系数为 $2.7 \times 10^{-5} \sim 5.2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$,平均渗透系数为 $3.79 \times 10^{-5} \text{ m/s}$; 0.8 m 深度以下无根系土饱和渗透系数为 $2.9 \times 10^{-6} \sim 5.6 \times 10^{-6} \text{ m/s}$,平均渗透系数为 $3.74 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 。由此可见,植被根系在提高加筋区土体抗剪强度的同时,还会增大加筋区土体渗透系数,加速台风期间边坡内部雨水入渗。

2 植被根系优势渗流效应

2.1 染色示踪试验与剖面图像识别

植被根系在提供附加抗剪强度加固边坡的同时还能通过根-土间隙、促进裂隙和结构性孔隙发展等方式提供优势渗流通道加速雨水入渗^[32]。根系土渗透试验表明根系的存在导致土体渗透性能大幅提高,因此为进一步明确乔木植被覆盖边坡优势渗流通道发育类型及规律,本文于地形相对平坦处选取一株马尾松植被作为研究对象开展现场染色示踪试验。染色面积 $1.2 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ (图 6),主要试验步骤如下:

(1) 沿场地四周边界开挖深度 20 cm 、宽 3 cm 凹槽,将木板安置于内,减少染色过程中侧向径流。为保护植被,同时考虑根系发育方向,开挖凹槽位置如图 6

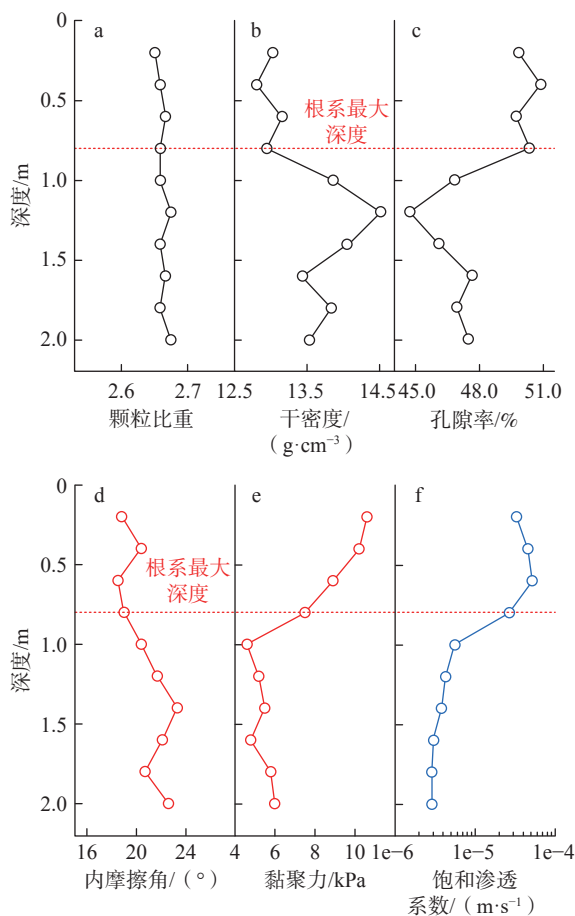


图 5 根系对土体物理力学性质影响

Fig. 5 Impacts of roots on soil properties

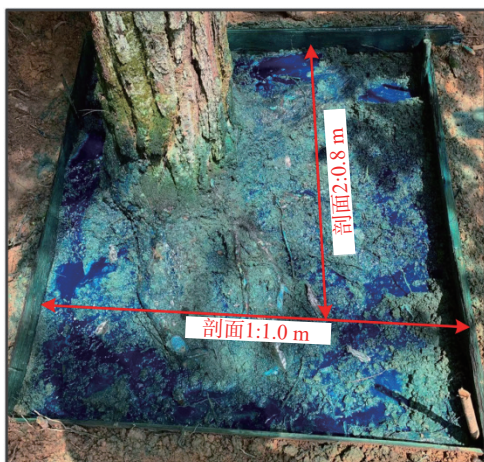


图 6 染色示踪试验

Fig. 6 Dye tracer test

所示。

(2) 配置 4 g/L 亚甲基蓝染色示踪剂, 按 50 mm/h 的降雨强度均匀喷洒于试验区, 连续喷洒 3 h (150 mm 降雨量)。溶液喷洒完成后, 用树叶和不透明塑料膜遮盖试验区以减少水分蒸发带来的影响。

(3) 静置 24 h 待染色完成, 沿预定位置(图 6)开挖竖向剖面, 采用毛刷和小刀清理开挖过程中吸附在土体剖面上的松散颗粒, 确保剖面整洁; 采用高清照相机拍摄染色剖面, 用于开展后续图像识别分析。

(4) 采用 ImageJ®图像处理软件对染色剖面开展图像识别分析: 于 ImageJ®软件中调节合适阈值对图像进行灰度化处理, 在此基础上采用 Java 编程语言进行二次开发, 利用自动化网格划分技术对染色剖面图像进行竖向等间距自动化分层, 并采用 Measure 和 Macro 功能实现图像批量处理, 计算得到各竖向分层染色面积。该自动化网格划分技术能显著提高图像识别效率和精度。

土体内部雨水入渗由均匀入渗和优势入渗两部分构成, 根据 Barges 等^[33]和 Luo 等^[34], 采用染色面积比(DC)和优势渗流比($Pr-fr$)表征土体竖向剖面内染色面积和优势渗流效应:

$$DC = \frac{D}{D+ND} \times 100\% \quad (8)$$

式中: DC——染色面积比, 为剖面内染色面积与总面积的比值/%;

D——染色面积/ m^2 ;

ND——未染色面积/ m^2 。

$$Pr-fr = \left(1 - \frac{UniFr \cdot W}{TSA}\right) \times 100\% \quad (9)$$

式中: $Pr-fr$ ——优势渗流比, 为优势渗流染色面积与总染色面积的比值/%;

UniFr——均匀入渗染色深度/m, 当土体剖面某一深度处染色面积达到 80% 认为发生均匀入渗, 小于 80% 认为发生优势渗流^[33];

W——剖面宽度/m;

TSA——总染色面积/ m^2 。

2.2 染色示踪试验结果分析

染色示踪结果如图 7 所示, 剖面开挖深度为 80 cm。为获取剖面染色面积比(DC)随深度变化规律, 以 2 cm 为间隔(共 40 层)进行自动化网格划分。图像识别结果表明: 两处开挖剖面内染色面积比(DC)随深度变化总体呈下降趋势。地面以下 0~8 cm 染色面积比(DC)超过 80%, 表明该区域以土体均匀入渗为主; 8 cm 深度以下, 染色面积比(DC)开始迅速降低, 此时剖面内渗流以优势入渗为主。

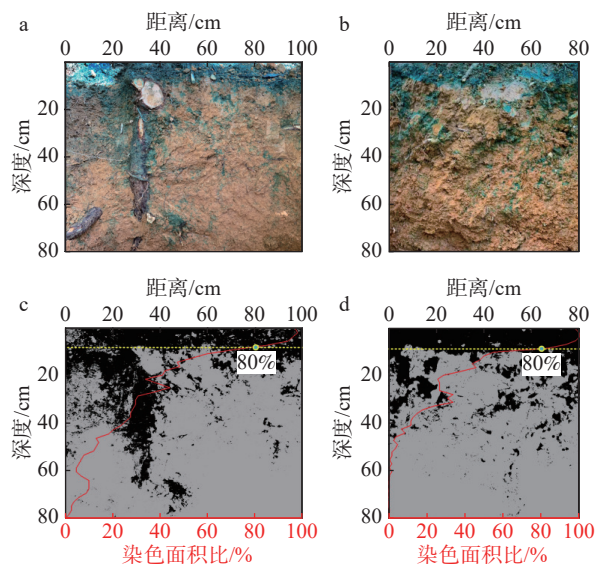


图 7 染色示踪试验结果

Fig. 7 Dye tracer test results

根据式(9), 剖面 1 内总染色面积(TSA)为 2 710 cm^2 , 均匀入渗染色面积为 724 cm^2 , 优势渗流比 $Pr-fr$ 为 73.3%, 优势渗流占比约为坡面均匀入渗 3 倍。尽管剖面内存在少量裂隙和虫洞, 优势渗流染色区域多集中于植被根系附近, 特别是大直径粗根。如图 7a 所示, 8 cm 深度以下, 优势渗流主要发生于剖面左侧起 0~40 cm 区域内, 该区域为植被根系发育区, 染色溶液以粗根系为中心向四周呈辐射状扩散渗流, 根-土间隙是该剖面内优势渗流的主要来源。剖面 2 染色示踪结果如图 7b 所示, 染色面积比 DC 随深度增大不断降低, 在 65 cm

深度处趋近于零。剖面2总染色面积(*TSA*)为1603 cm²,均匀入渗染色面积为627 cm²,即优势渗流比 *Pr-fir* 为60.9%。尽管该剖面内优势渗流占比略低于剖面1,优势渗流所占比重仍高于土体均匀入渗且集中于根系附近。相较于剖面1,剖面2中植被根系数量和截面积相对较小,且缺乏大直径粗根,因此优势渗流通道分布较为零散。

为进一步论证植被根系与林下边坡优势渗流特性的关系,于两处开挖剖面内以10 cm为间隔分层采集植被根系信息,分析根系截面积与剖面染色面积关系,结果如图8所示。两处剖面内土体染色面积和根系面积表现出相近的变化规律,随深度增大显著降低且降低幅度相近,表现出正相关性。剖面1中由于大直径粗根的存在,根系最大截面积超过3.5 mm²/cm²,远高于剖面2中根系面积,因此在20 cm深度以下剖面1中染色面积显著高于剖面2染色面积。剖面2中根系面积和染色面积在40 cm深度以下均趋近于零,表明该深度优势渗流效应十分微弱。由此可见,本文染色示踪试验开挖剖面内优势渗流通道主要由马尾松植被根系提供,大直

径粗根系由于其大截面面积,产生的优势渗流效应对雨水快速入渗尤为重要,因此在开展边坡稳定性分析、探究台风暴雨型浅层滑坡失稳机制时需重点考虑乔木植被主根系优势渗流效应。

3 结果综合分析和讨论

我国东南沿海地区台风触发滑坡灾害多发于乔木植被覆盖边坡土岩基覆界面和土层内部软弱界面,时间滞后性弱^[14-15,25]。本文试验结果表明,植被可通过力学和水文作用对边坡稳定性产生影响,促进潜在滑面的形成(图9)。

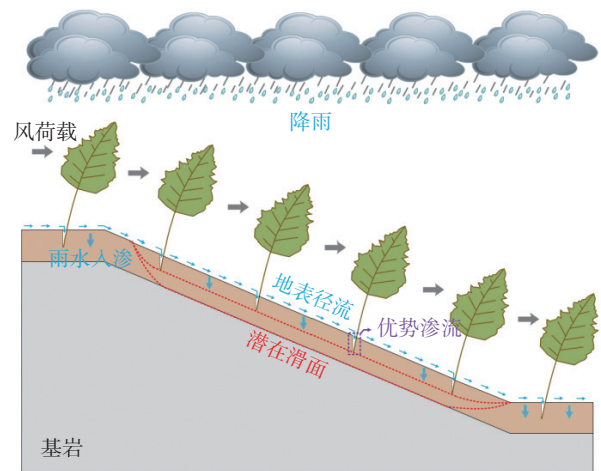
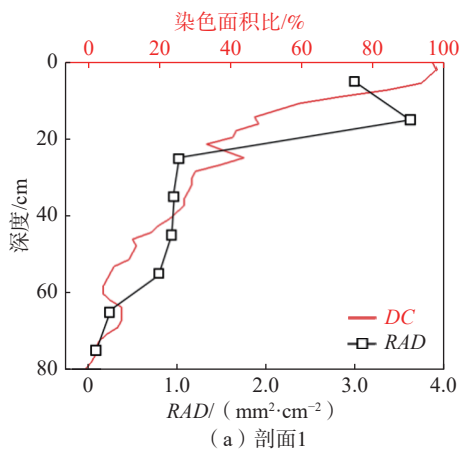


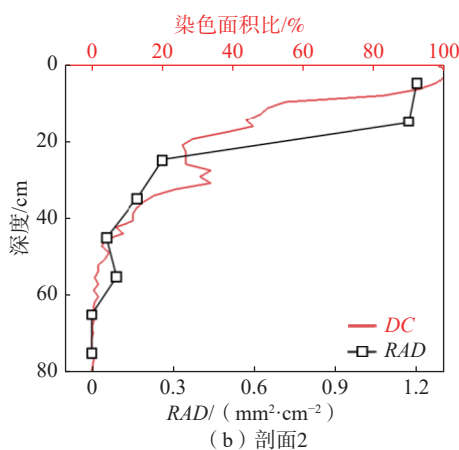
图9 台风触发浅层滑坡失稳机制示意图

Fig. 9 Schematic representation of the failure mechanism of typhoon-induced shallow landslides

研究区乔木植被为典型的具有主根的深根乔木植被,根系发育深度大,侧向须根相对数量少,可通过大直径根系力学加筋和提供优势渗流通道改变土体物理力学特性,且两种作用机制均与植被根系发育深度密切相关。根系力学加筋机制主要通过根-土作用提供附加黏聚力的方式加固边坡,能显著提高加筋区土体抗剪强度,但同时也导致根系最大发育深度处存在力学性质差异。此外,边坡土体优势渗流所占比重远高于坡面均匀入渗,且土体内部优势渗流通道主要由乔木植被根系提供。根系提供的优势渗流效应能加速台风期间雨水入渗速率,使得浅表层土体在短历时台风期间处于高饱和状态。考虑到加筋区土体渗透性远高于无根土,因此植被根系尖端易形成汇水区。上述力学和水文机制使得植被根系发育深度处形成软弱面。由于研究区台风暴雨型滑坡多发于直线型和凸型边坡^[13,24],相较于凹型边坡,承受风荷载受两侧山体影响较小,台风期间边坡覆盖的植被往往承受更大的风荷载。尽管乔木植被的粗



(a) 剖面1



(b) 剖面2

图8 根系面积与剖面染色面积关系

Fig. 8 Relationship between the root area and the dyed area

壮根系相比于灌木和草地拥有更大的截面积和更深的发育深度,但其高耸结构和大迎风面积可将风荷载传递至边坡,作为下滑力对边坡稳定性产生不利影响。上述台风暴雨型滑坡特殊的发育特征为明确台风荷载影响提供了依据。考虑到台风期间,乔木植被以根系为纽带与边坡土体作用,将风荷载传递至边坡^[15],因此,当下滑力(风荷载、土体自重、植被超载)超过抗滑力时,易于根系最大发育深度附近诱发滑坡灾害,即植被根系最大发育深度处为林下边坡潜在滑面,该类型浅层滑坡可在短时间内发生。

对发生于边坡内部植被根系发育深度以下的区域,潜在滑面埋藏深度大于根系发育深度,根系力学加筋和优势渗流效应影响较小,此时边坡稳定性受控于土-岩基覆界面力学与渗透特性差异。研究区边坡多具有二元结构,上层为第四系松散堆积下伏基岩,完整度较高的基岩可视作不透水或弱透水层。当雨水入渗至土-岩基覆界面时,发生侧向径流,形成瞬态饱和区,显著降低土体抗剪强度。因此,边坡内部土-岩基覆界面同样为台风暴雨型滑坡灾害潜在滑面边坡的风荷载和根系提供的优势渗流效应是边坡快速失稳的关键因素。上述 2 种边坡失稳模式与现场调查结果基本吻合。

4 结论

(1) 相较于须根系植被,马尾松大直径粗根系发育,侧向根系相对少,主根系发育深度可达 2 m,距地面 0.4 m 深度以下,植被根系主要由马尾松乔木植被提供,草本植物贡献微弱;相较于细根,剖面内粗根截面积占比超过 80%。对边坡稳定性有重要影响。

(2) 土工试验和染色示踪试验结果表明:根系在提供附加黏聚力加固边坡的同时,通过提供优势渗流通道提高土体渗透系数,增大雨水入渗速率,根系土渗透系数可达无根土 10 倍。此外,土体内部优势渗流效应与根系截面积密切相关,大直径粗根系由于其大截面积,产生的优势渗流效应对雨水快速入渗尤为重要,雨水会沿根-土界面向四周呈辐射状扩散。边坡内部优势渗流所占比重可达坡面均匀入渗的 2~3 倍。

(3) 植被对边坡稳定性的影响与其力学和水文机制密切相关。其力学加筋和优势渗流效应促使植被根系最大发育深度处成为潜在滑面,在风荷载和强降雨作用下极易短时间内发生失稳;土-岩基覆界面为林下边坡内部另一潜在滑面,由于埋藏深度较大,受根系力学加筋作用影响微弱,但根系提供的优势渗流效应仍能促使边坡在短历时台风期间失稳。

参考文献(References):

- [1] 张庆云,陶诗言,彭京备.我国灾害性天气气候事件成因机理的研究进展[J].*大气科学*,2008,32(4):815-825. [ZHANG Qingyun, TAO Shiyan, PENG Jingbei. The studies of meteorological disasters over China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 815-825. (in Chinese with English abstract)]
- [2] YASUHARA K, MURAKAMI S, MIMURA N. Geo-disasters in the context of climate change [J]. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2015, 3(2): 45-50.
- [3] BAKKENSEN L A, MENDELSON R. Global tropical cyclone damages and fatalities under climate change: An updated assessment [J]. *Hurricane Risk*, 2019, 179-197.
- [4] 施素芬,赵利刚.强台风“云娜”灾害特征及其评估[J].*气象科技*,2006,34(3):315-318. [SHI Sufen, ZHAO Ligang. Characteristics of severe typhoon rananim and its assessment [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2006, 34(3): 315-318. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 郭云谦,王毅,沈越婷,等.台风“利奇马”不同区域降水极端性特征及成因分析[J].*气象科学*,2020,40(1):65-77. [GUO Yunqian, WANG Yi, SHEN Yueting, et al. Analysis on characteristics of the extreme precipitation of typhoon “Lekima” [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2020, 40(1): 65-77. (in Chinese with English abstract)]
- [6] ZHUANG Yu, XING Aiguo, SUN Qiang, et al. Failure and disaster-causing mechanism of a typhoon-induced large landslide in Yongjia, Zhejiang, China [J]. *Landslides*, 2023, 20(10): 2257-2269.
- [7] CHAU K T, SZE Y L, FUNG M K, et al. Landslide hazard analysis for Hong Kong using landslide inventory and GIS [J]. *Computers & Geosciences*, 2004, 30(4): 429-443.
- [8] TSOU C Y, FENG Zhengyi, CHIGIRA M. Catastrophic landslide induced by typhoon Morakot, Shialin, Taiwan [J]. *Geomorphology*, 2011, 127(3/4): 166-178.
- [9] SAITO H, KORUP O, UCHIDA T, et al. Rainfall conditions, typhoon frequency, and contemporary landslide erosion in Japan [J]. *Geology*, 2014, 42(11): 999-1002.
- [10] SAMODRA G, NGADISIH N, MALAWANI M N, et al. Frequency-magnitude of landslides affected by the 27-29 November 2017 Tropical Cyclone Cempaka in Pacitan, East Java [J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(4): 773-786.
- [11] NG C W W, YANG B, LIU Z Q, et al. Spatiotemporal modelling of rainfall-induced landslides using machine learning [J]. *Landslides*, 2021, 18(7): 2499-2514.
- [12] 王照财.风荷载作用下植被对边坡稳定性影响研究[D].成都:成都理工大学,2014. [WANG Zhaocai. Study on the influence of vegetation on slope stability under wind load [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)]

- [13] 张泰丽. 浙江省东部台风暴雨诱发滑坡变形特征和成因机制研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2016. [ZHANG Taili. Study on deformation characteristics and genetic mechanism of landslide induced by typhoon and rainstorm in eastern Zhejiang Province [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 闫金凯, 黄俊宝, 李海龙, 等. 台风暴雨型浅层滑坡失稳机理研究 [J]. *地质力学学报*, 2020, 26(4): 481–491. [YAN Jinkai, HUANG Junbao, LI Hailong, et al. Study on instability mechanism of shallow landslide caused by typhoon and heavy rain [J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(4): 481–491. (in Chinese with English abstract)]
- [15] ZHUANG Yu, XING Aiguo, JIANG Yuehua, et al. Typhoon, rainfall and trees jointly cause landslides in coastal regions [J]. *Engineering Geology*, 2022, 298: 106561.
- [16] BUMA B, JOHNSON A C. The role of windstorm exposure and yellow cedar decline on landslide susceptibility in southeast Alaskan temperate rainforests [J]. *Geomorphology*, 2015, 228: 504–511.
- [17] EMADI TAFTI M, ATAIE ASHTIANI B. A modeling platform for landslide stability: A hydrological approach [J]. *Water*, 2019, 11(10): 2146.
- [18] 孔维伟, 赵其华, 韩俊, 等. 台风滑坡变形破坏机制模型试验研究 [J]. *工程地质学报*, 2013, 21(2): 297–303. [KONG Weiwei, ZHAO Qihua, HAN Jun, et al. Model experiments for deformation and failure mechanism of typhoon induced landslide [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21(2): 297–303. (in Chinese with English abstract)]
- [19] FORRER I, PAPRITZ A, KASTEEL R, et al. Quantifying dye tracers in soil profiles by image processing [J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(2): 313–322.
- [20] SCHWÄRZEL K, EBERMANN S, SCHALLING N. Evidence of double-funneling effect of beech trees by visualization of flow pathways using dye tracer [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 470: 184–192.
- [21] 张家明, 徐则民, 李峰. 植被发育斜坡土体大孔隙分布特征的染色示踪法研究 [J]. *山地学报*, 2015, 33(1): 1–7. [ZHANG Jiaming, XU Zemin, LI Feng. Heterogeneous characteristics of macropores in soil of well vegetated slopes by dye tracing method [J]. *Mountain Research*, 2015, 33(1): 1–7. (in Chinese with English abstract)]
- [22] YANG Ming, DÉFOSSEZ P, DUPONT S. A root-to-foilage tree dynamic model for gusty winds during windstorm conditions [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 287: 107949.
- [23] MAIR A, DUPUY L X, PTASHNYK M. Model for water infiltration in vegetated soil with preferential flow oriented by plant roots [J]. *Plant and Soil*, 2022, 478(1): 709–729.
- [24] ZHUANG Yu, XING Aiguo, PETLEY D, et al. Elucidating the impacts of trees on landslide initiation throughout a typhoon: Preferential infiltration, wind load and root reinforcement [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2023, 48(15): 3128–3141.
- [25] 豆红强, 简文彬, 王浩, 等. 高植被覆盖区台风暴雨型滑坡成灾机制及预警模型研究综述 [J]. *自然灾害学报*, 2023, 32(2): 1–15. [DOU Hongqiang, JIAN Wenbin, WANG Hao, et al. Review of failure mechanism and early warning model of landslides induced by typhoon and associated rainstorm in high vegetation coverage area [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2023, 32(2): 1–15. (in Chinese with English abstract)]
- [26] LEUNG A K, GARG A, COO J L, et al. Effects of the roots of *Cynodon dactylon* and *Schefflera heptaphylla* on water infiltration rate and soil hydraulic conductivity [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(15): 3342–3354.
- [27] JOTISANKASA A, SIRIRATTANACHAT T. Effects of grass roots on soil-water retention curve and permeability function [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, 54(11): 1612–1622.
- [28] CAMIRÉ C, CÔTÉ B, BRULOTTE S. Decomposition of roots of black alder and hybrid poplar in short-rotation plantings: Nitrogen and lignin control [J]. *Plant and Soil*, 1991, 138(1): 123–132.
- [29] 宋尊荣, 秦佳双, 李明金, 等. 亚热带马尾松人工林根系生物量分布格局 [J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 38(1): 149–156. [SONG Zunrong, QIN Jiashuang, LI Mingjin, et al. Study on root biomass of pinus massoniana plantations in subtropical China [J]. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2020, 38(1): 149–156. (in Chinese with English abstract)]
- [30] WU T H, MCKINNELL W P, SWANSTON D N. Strength of tree roots and landslides on prince of Wales Island, Alaska [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1979, 16(1): 19–33.
- [31] MATSUSHI Y, MATSUKURA Y. Cohesion of unsaturated residual soils as a function of volumetric water content [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2006, 65(4): 449–455.
- [32] GHESTEM M, SIDLE R C, STOKES A. The influence of plant root systems on subsurface flow: Implications for slope stability [J]. *BioScience*, 2011, 61(11): 869–879.
- [33] TOBELLA A B, REESE H, ALMAW A, et al. The effect of trees on preferential flow and soil infiltrability in an agroforestry parkland in semiarid Burkina Faso [J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(4): 3342–3354.
- [34] LUO Ziteng, NIU Jianzhi, ZHANG Linus, et al. Roots-enhanced preferential flows in deciduous and coniferous forest soils revealed by dual-tracer experiments [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2019, 48(1): 136–146.