DOI：10.16285/j.rsm.2023.1563

风驱雨作用下植被斜坡稳定性响应研究

林滨强[1]，章德生[1]，简文彬[1,2]，豆红强[1,2]，王 浩[1,2]，樊秀峰[1,2]

（1. 福州大学 紫金地质与矿业学院 岩土与地质工程系，福建 福州 350108；2. 福州大学 地质工程福建省高校工程研究中心，福建 福州 350108）

摘 要：闽东南高植被覆盖区台风暴雨型滑坡频发，探索在植被、降雨、强风作用下的滑坡失稳演化及其规律对揭示高植被覆盖区台风暴雨型滑坡的成灾机制、监测预警具有重要的理论及实际意义。以福建省永泰县洋斜滑坡为研究对象，对斜坡上的毛竹进行拉拔试验以及对根土区进行单环入渗试验，结合 Green-Ampt 模型和无限边坡模型，研究在台风暴雨作用下植被土坡的稳定性响应规律及其稳定性分析方法。结果表明：（1）毛竹抵御的极限风速主要在 18～30 m/s 的范围之内，对应 8～11 级风力范围。（2）毛竹迎风区土体入渗能力随着风速的增长而增长，0～12 m/s 内入渗能力基本不变，12 m/s 以上入渗能力迅速增长。（3）根土区湿润锋的迁移速度随着风速和降雨强度的增大而加快，台风通过植被扰动土体形成优势渗流，对入渗的影响主要在于加快了湿润锋的迁移速度。风−雨−植被协同作用下，风速是影响土体入渗能力的重要因素。（4）台风暴雨作用下风荷载通过植被加快根区土降雨入渗，从而增大湿润锋迁移速度，是台风暴雨型滑坡孕灾、成灾的重要环节。

关 键 词：降雨；边坡稳定性；风荷载；湿润锋；滑坡

中图分类号：TU447 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2024) 09－2765－10

Response of vegetated slope stability under wind-driven rain conditions

LIN Bin-qiang[1], ZHANG De-sheng[1], JIAN Wen-bin[1,2], DOU Hong-qiang[1,2], WANG Hao[1,2], FAN Xiu-feng[1,2]

(1. Department of Geotechnical and Geological Engineering, Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China; 2. Engineering Research Center of Geological Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: Landslides frequently occur in heavily vegetated areas of southeast Fujian Province due to typhoon rainstorms. Investigating the failure mechanisms and evolution patterns of landslides influenced by vegetation, rainfall, and strong winds is crucial for disaster mechanism, monitoring, and early warning of typhoon-induced landslides in densely vegetated regions. This study focuses on the Yangxie landslide in Yongtai County, Fujian Province, investigating response patterns and analysis methods for vegetated slope stability under wind-driven rain conditions. Pulling tests on moso bamboo and single-ring infiltration tests were conducted, integrating the Green-Ampt model and infinite side slope model. Detailed main results include: 1) Bamboo's maximum wind resistance ranges from 18 m/s to 30 m/s, corresponding to wind forces of 8 to 11. 2) Soil infiltration capacity in the windward area increases with wind speed, remaining constant at 0–12 m/s but rising rapidly beyond 12 m/s. 3) The wetting front's migration speed in the root-soil zone accelerates with increasing wind speed and rainfall. Typhoons disturb soil by swaying vegetation to create preferential flow, mainly accelerating the wetting front's migration speed. Wind speed significantly impacts soil infiltration capacity under wind, rain, and vegetation interactions. 4) During typhoon rainstorms, wind loads enhance rainfall infiltration in the root-soil zone through vegetation, thereby speeding up the wetting front's migration. This process is critical for typhoon-induced landslide occurrence and development.

Keywords: rainfall; slope stability; wind loads; wetting front; landslide

1 引 言

福建省地处中国东南沿海，山地、丘陵众多，该地区残积土发育，残积土坡多，土层厚，加之雨量充沛，从而形成了大量的滑坡[1-2]。中国是受台风影响最严重的国家之一，台风登陆带来的强风及短

收稿日期：2023-10-17 录用日期：2024-01-10
基金项目：国家自然科学基金（No.U2005205）。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (U2005205).
第一作者简介：林滨强，男，2000 年生，硕士研究生，主要从事边坡工程方面的研究。E-mail: 1121544630@qq.com
通讯作者：简文彬，男，1963 年生，博士，教授，主要从事岩土工程与工程地质研究。E-mail: jwb@fzu.edu.cn

时强降雨是地质灾害的主要诱发因素，因此台风期间地质灾害频发。国内外对台风暴雨型滑坡的研究主要集中在台风期间的极端强降雨上。关于降雨促使滑坡失稳的机制，已有不少学者进行了相关的研究[3-14]。研究早期，学者们[15-18]普遍认为植被对水土保持及土坡稳定方面具有积极意义，包括有林冠截流、根系固土、根系吸力等作用。随着研究的深入，学者们发现植被对滑坡也具有负效应：一方面，植被覆盖区域的岩土体发育有大孔隙，如根土间隙、根系腐烂后产生的通道、生物孔洞等，使得岩土体的渗透能力大大增强，从而促进土坡发生失稳破坏；另一方面，在台风期间，强风在植被上施加的风荷载传入土体，风荷载致使根土区发生松动甚至树木倾倒，造成植被根部和周围土体开裂，土体松动以及裂缝的存在加速雨水下渗的速度，进一步引起土坡的失稳[19-22]。

如今，在全球气候变暖的大背景下，台风数量增加的趋势值得关注。对于福建省高植被地区的台风暴雨型滑坡，更需综合考量多方面的致灾因素，进一步研究土坡在植被、台风、极端降雨三者共同作用下的失稳演化及其规律。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

研究区位于福建省福州市永泰县，全年降水量在 1 400～2 000 mm 之间，滑坡位于山体土坡中下部，坡脚为密集的民房聚集区，整体下缓上陡，前缘坡度约 15º～20º，中上部坡度约 35º～40º。坡体主要有竹林、灌、乔木等植物，植被覆盖较好。研究区航拍图见图 1。



图 1 研究区示意图
Fig.1 Schematic map of study area

研究区主要植被为毛竹，所以本文选取毛竹作为研究对象。在研究区内选取 3 块 20 m×20 m 的样地，对样地内的毛竹进行每木检尺，调查毛竹生长参数，调查参数包括胸径、株高、冠幅和枝下高。获得的研究区毛竹平均参数如表 1 所示。

表 1 研究区毛竹参数平均值
Table 1 Mean values of moso bamboo parameters

毛竹参数	胸径/cm	株高/m	枝下高度/m	冠幅/m
标准毛竹	12.3	16.5	9.8	2.1

根据根系调查，研究区毛竹根系深度主要在 80～100 cm 范围内。在深度 40 cm 以下，毛竹根系直径逐渐变大，多见粗根，细根系较少。毛竹鞭根主要存在于 0～60 cm 深度范围内，多见于 40～60 cm，毛竹鞭根向四周延伸，长度在 3～5 m 范围内。毛竹根土盘呈现为椭圆锥体，长轴为 50～100 cm，短轴为 30～50 cm，根土盘尺寸随着毛竹胸径的增大而增大。

2.2 毛竹风荷载简化模型

在台风暴雨条件下冠层的截留作用很小，而风荷载影响却很大。冠层的尺寸由植物的种类和年龄所决定，尺寸越大，风荷载越明显。冠层上的单位面积受到的风压力与风速冠层阻力系数有关，可由以下公式计算：

$$P_{\mathrm{w}}=\frac{1}{2}\rho_{\mathrm{a}}\mu^{2}C_{\mathrm{d}} \tag{1}$$

式中：P_{w} 为风压力；ρ_{a} 为空气密度；μ 为平均风速；C_{d} 为冠层阻力系数。

冠层阻力系数与林带透风系数有关，其转换关系如下式[23]：

$$C_{\mathrm{d}}\approx 0.86\left(1-\alpha_{\mathrm{d}}^{2}\right) \tag{2}$$

式中：α_{d} 为林带透风系数，可根据林带结构获得。

为方便毛竹风荷载的计算，将毛竹冠层简化为三角形，毛竹树高为 H，枝下高度为 h。冠层所受风荷载为分布荷载，由于毛竹胸径较小，冠层以下位置不计入风荷载的计算，如图 2 所示。

则传入坡体土壤的风荷载 F_{w} 由下式计算：

$$F_{\mathrm{w}}=A_{\mathrm{f}}P_{\mathrm{w}} \tag{3}$$

式中：A_{f} 为毛竹简化模型的迎风面积。

2.3 现场试验

台风所产生的强风多为阵风，易使植被摇曳，扰动根部土体。针对台风风荷载的作用特点，对植株施加静态拉力，并通过交替增加和减小拉力来模拟阵风的作用效果。与植株实际中直接承受风荷载

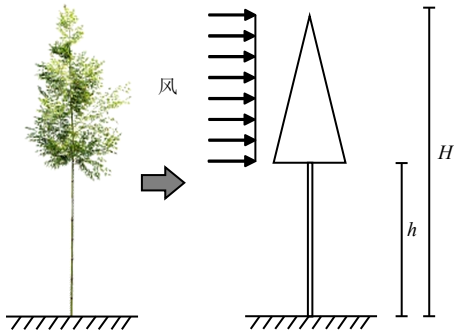


图 2　毛竹风荷载简化示意图
Fig.2　Simplified diagram of wind load on moso bamboo

相比，该方法能够产生类似的试验结果，具有一定的可靠性[24-27]。本次研究按照上述方法，对研究区不同胸径的毛竹进行拉拔试验，模拟毛竹在风荷载作用下的受力情况。研究区受强风影响的时间主要是在台风登陆前后的数小时内，因此，根据试验场地和试验设备的特点，试验模拟的持续时间为 3 h。

在现场测试中，除了毛竹拉拔试验之外，还在不同风荷载下对毛竹迎风区根土复合体进行单环入渗试验，以获得不同风速情况下的土体渗透系数。研究区的毛竹密度为 1.13 株/m^2，毛竹的迎风区指的是迎风侧根土区，毛竹根土区在平面上呈椭圆形，长轴为 80～100 cm，接近毛竹间距，研究区表层土充满了毛竹纵横交错的根系。在风荷载作用下，迎风区相较背风区更易出现根系断裂、土体扰动的现象，土体渗透系数变化也更加明显，所以选择迎风区作为入渗试验的试验点。但是根土区的渗透性受到多种因素的影响，为了获得更全面和准确的渗透系数数据，本次研究扩大试验范围，在不同迎风区随机选取多个试验点，从而更好地代表整个根土区的渗透情况。

试验所用的仪器设备包括 Toyointl 钢丝绳手板葫芦（3.2 t）、钢绞线（16 mm）、抱树带、U 型钩、JHPY-2 旁压张力计（0～5 t）、XMT808-I 智能显示仪表、单环（高为 50 cm，直径为 30 cm）、220 V 移动电源。

毛竹拉拔试验采用带有旁压张力计的钢绞线，通过 U 型钩与抱树带相连并绑扎在毛竹离地 2 m 的位置。钢绞线另一端连接钢丝绳手板葫芦来提供拉力，手板葫芦末端连接反力装置，反力装置由抱树带和距离测试株较远距离的毛竹组成，以此来对毛竹施加近乎水平的拉力荷载模拟风荷载，见图 3。试验过程中，拉力值由旁压张力计连接 XMT808-I 智能显示仪表进行持续监测。

根据计算所得的 0、6、12、18、24 m/s 风速所对应的拉力，将毛竹拉至指定拉力荷载后固定，在迎风区进行单环入渗试验。选取试验点，清理并开挖出 10 cm 的槽，并将单环压入槽底，用周围土体将单环外侧封堵压实，防止水的渗漏；在试坑外注水达到饱和，以减小试验时渗透达到稳定的时间，如图 4 所示。准备工作完成后，向单环内注水，并维持单环内的水位在 10 cm 的位置处，在 0、1、3、5、8、10、15、20、30、40、50、60、70、80、90、100、110、120 min 时记录消耗的水量，直至渗透趋于稳定，获得渗透系数。



图 3　毛竹拉拔试验
Fig.3　Pulling test of moso bamboo



图 4　单环入渗试验
Fig.4　Single-ring infiltration test

3　试验结果分析

3.1　试验毛竹胸径与极限风速关系

在毛竹拉力试验过程中，胸径为 9、12、15 cm 的毛竹分别在位移为 35、50、75 cm 处出现根系断裂的声音，在位移为 45、90、100 cm 处观测到迎风区土体的隆起，说明毛竹在对应的 12～24 m/s 风速范围内开始出现根系断裂，随后出现土体隆起现象。图 5 所示是不同胸径的毛竹拉力试验曲线，可见：胸径为 9 cm 的毛竹的拉力峰值出现在位移为 40 cm 处，其峰值为 2.6 kN，对应的风速值为 18.5 m/s，

风级为 8 级；胸径为 12 cm 的毛竹的拉力峰值出现在位移为 80 cm 处，其峰值为 5.9 kN，对应的风速值为 27.7 m/s，风级为 10 级；胸径为 15 cm 的毛竹的拉力峰值出现在位移 100 cm 处，其峰值为 6.92 kN，对应的风速值为 30 m/s，风级为 11 级。

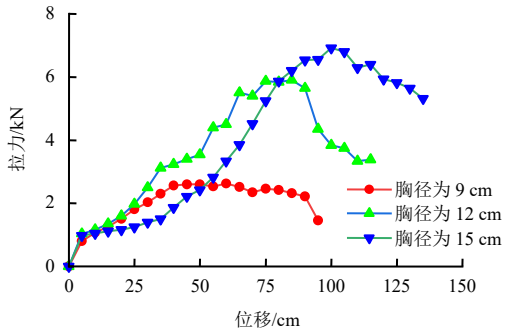


图 5 不同胸径毛竹拉力–位移曲线

Fig.5 Curves of tension-displacement of moso bamboo with different diameters at breast height

不同胸径下毛竹的拉力–位移曲线趋势相似，均为前期快速增长，增长幅度逐渐减小直到毛竹所能承受拉力达到峰值，在峰值处维持一段位移后便快速下降。前期由土体发挥强度致使拉力快速上升，随着变形的不断增大，土体强度丧失，由根系发挥其抗拉效应。由于根系的材料特性致使增长相同的拉力值所需要的位移值增大，而呈现出曲线逐渐变缓的趋势。但随着毛竹倾覆角度增大，根系开始出现断裂，土体隆起，拉力值维持在某一个值附近，最终随着迎风区根系全部断裂而不足以支撑毛竹，引起毛竹的倾覆现象。

图 6 所示是毛竹胸径与极限风速的关系曲线，可发现在胸径 9～15 cm 的区间内，毛竹能承受的极限风速随着毛竹胸径的增大而增大，但随着胸径的增长，极限风速的增长幅度逐渐变小，在 9～13 cm 区间强度呈现出快速增长的趋势，在 13 cm 后则增长缓慢。经拟合，毛竹胸径和极限风速的关系变化曲线呈现为二次函数关系。毛竹能承受的极限风速在 18～30 m/s 的范围，对应 8～11 级风力范围。这表明，若台风登陆后，到达该研究区时中心风力保持在 12 级及以上，将会引发研究区毛竹根系掘根现象。2023 年第 11 号台风“海葵”在台湾登陆时，台风中心附近的最大风力达到 15 级，而福州地区的最大风力则达到了 9～10 级，研究区部分毛竹出现倒伏和掘根现象，其中胸径小于 12 cm 的毛竹占据了大多数（见图 7）。由掘根而形成的大空洞以及毛竹摇曳和根系断裂引起的土体扰动，会使雨水快速下渗，形成优势渗流，导致含根土和下层土体之间的渗透系数差异，雨水滞留在含根区而引起积水，从而使得土体强度快速降低导致滑坡的发生。

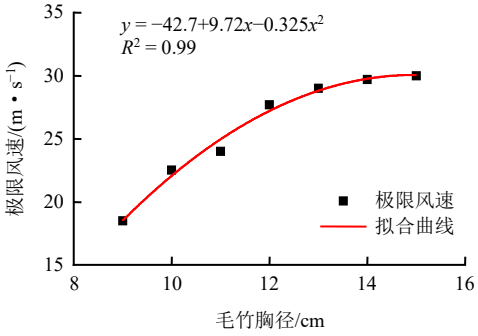


图 6 毛竹胸径与极限风速曲线

Fig.6 Curve of moso bamboo diameter at breast height versus limiting wind speed



图 7 台风导致的毛竹根系掘根、倒伏

Fig.7 Root digging and lodging of moso bamboo

3.2 根区土渗透性与风荷载作用时间关系

图 8 是毛竹迎风区土体的入渗曲线。可见无风速的情况下，含根区土体的渗透系数随时间出现先下降后稳定的趋势，稳定时土体的渗透系数为 3.3×10^{-4} cm/s。当风速增大到一定程度，迎风区土体渗透系数在 0～10 min 内快速下降，而后出现波动，并趋于稳定。在 6、12 m/s 的风速下，由于对应的拉力较小，产生的位移也较小，所引起的土体变形和扰动也较小，相较于初始状态，土体入渗量增长了 9%～15%。在 60 min 后趋于稳定，对应的渗透系数约为 5.2×10^{-4} cm/s，相较于无风速时根区土的渗透系数增长了 58%，增幅较小。说明在 0～12 m/s 的风速范围内产生的风荷载对土体的扰动仅产生微裂隙，微裂隙使得土体的孔隙体积增大，土体饱和所需的入渗量略有提高。然而，由于微裂隙之间并未互相连通，土体仍处于自然入渗状态，其渗透性能受影响较小。

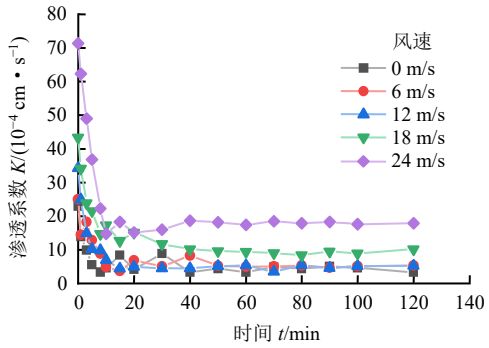


图 8　不同风速下单环入渗试验 *K-t* 曲线

Fig.8　*K-t* curves of single-ring infiltration test under different wind speeds

当风速大于 12 m/s 时，相应的拉力和位移值均较大，引起的土体变形和扰动也相对显著。同时，土体的初始入渗能力和渗透系数也迅速增加，特别是在 18、24 m/s 风速条件下，渗透系数分别为 9.8×10^{-4}、16.9×10^{-4} cm/s，相较于无风速时根区土的渗透系数分别增长了 197%和 412%，增幅较大。由于土体产生较大变形，微裂隙扩大并相互连接，迎风面上的主要裂缝也逐渐形成。在入渗过程中，主裂缝的扩展和互相连接、连通，形成了优先流通道，水流沿着该通道快速下渗，并通过根系通道和其他大孔洞快速分散，导致渗透系数和初始入渗量大幅度增加。

3.3　根区土渗透性与风速关系

图 9 为风速与渗透系数关系曲线。由图可见，迎风区土体的渗透系数在 12～24 m/s 的风速范围内快速增长。根据拉拔试验结果，毛竹在 12～24 m/s 的风速范围内出现根系断裂和土体隆起现象，说明风荷载引起的毛竹迎风区土体扰动主要体现在根系断裂而引起的土体大幅度变形和土体松动，同时迎风区土体的裂缝逐渐连接各区域的根系通道，从而引起土体渗透系数的进一步上升。

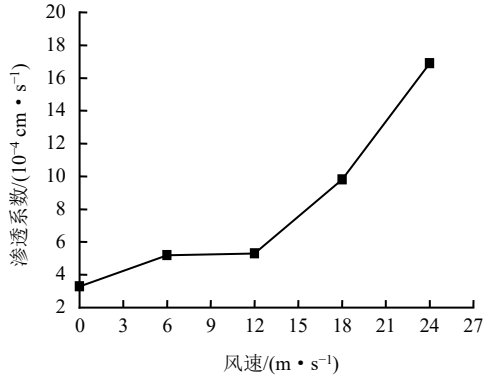


图 9　风速与渗透系数关系曲线

Fig.9　Curve of wind speed versus permeability coefficient

4　基于风−雨−植被协同作用下的边坡稳定性分析

结合 Green-Ampt 入渗模型和无限边坡模型，同时考虑风荷载和风荷载引起的土壤渗透性变化对边坡稳定性的影响，研究强风、降雨、植被共同作用下的边坡稳定性响应规律。

4.1　基于 GA 入渗模型并考虑风速和植被情况下的无限斜坡稳定性计算

4.1.1 Green-Ampt 入渗模型

斜坡坡面上的 Green-Ampt 入渗模型为[28]

$$i = K_s\left(\frac{z_w\cos\alpha + h_0 + s}{z_w}\right) \tag{4}$$

式中：i 为降雨入渗率；K_s 为土体饱和渗透系数；z_w 为概化湿润锋深度；h_0 为地表积水深度；s 为湿润锋平均基质吸力；α 为坡角。

在含水率分布均匀的条件下，根据水量平衡原理，土体在稳定入渗过程中，有

$$i\mathrm{d}t = (\theta_s - \theta_r)\mathrm{d}z_w \tag{5}$$

式中：θ_s 为饱和含水率；θ_r 为残余含水率。

累积入渗量 I 为

$$I = (\theta_s - \theta_r)z_w \tag{6}$$

令 $\Delta\theta = \theta_s - \theta_r$，结合式（4）～（6），可以获得时间 t 与湿润锋深度的函数关系式：

$$t = \frac{\Delta\theta}{K_s\cos\alpha}\left[z_w - \frac{(h_0+s)}{\cos\alpha}\ln\frac{z_w\cos\alpha + h_0 + s}{h_0 + s}\right] \tag{7}$$

1973 年，Mein 等[29]将 Green-Ampt 模型进行了推广，在考虑降雨入渗的情况下提出了新的入渗模型，将雨水入渗分成了水头控制阶段和流量控制阶段。假设稳定降雨时降雨强度为 p，当处于非积水入渗模式时，土体累积入渗量 I 为

$$I = p\cos\alpha\cdot t = (\theta_s - \theta_r)z_w \tag{8}$$

此时的湿润锋深度为

$$z_w = \frac{p\cos\alpha}{\Delta\theta}t \tag{9}$$

当 p 大于土体的入渗能力时，地表才会出现积水。由 Green-Ampt 模型的入渗率公式可知，土体入渗率随着累积入渗量的增加而减小。假设开始地表开始积水的时间为 t_p，此时的湿润锋深度为 z_{wp}，降雨强度刚好等于土体的入渗能力，则有

$$i = p\cos\alpha = K_s\left(\frac{z_{wp}\cos\alpha + s}{z_{wp}}\right) \tag{10}$$

$$z_{wp} = \frac{s}{\cos\alpha\left(\dfrac{i}{K_s} - 1\right)} \tag{11}$$

结合式（9）～（11），获得坡面开始积水的时间为

$$t_p = \frac{\Delta\theta \cdot s}{p\cos^2\alpha\left(\dfrac{p}{K_s} - 1\right)} \tag{12}$$

当土体入渗模式转为积水入渗后，结合式（7），取边界条件 $t = t_p$，$z_w = z_{wp}$，假定坡表积水深度为0，则可获得转为积水入渗模式后时间与土体湿润锋深度的函数关系式：

$$t - t_p = \frac{\Delta\theta}{K_s\cos\alpha}\left[z_w - z_{wp} - \frac{s}{\cos\alpha}\ln\frac{z_w\cos\alpha + s}{z_{wp}\cos\alpha + s}\right] \tag{13}$$

4.1.2 无限边坡模型

针对植被覆盖区降雨诱发的滑坡特点，根据其破坏机制分析可知，该类滑坡滑动面通常较浅，滑动面的深度与滑面的长度相比较小，所以一般采用无限边坡模型进行分析，即假定滑坡为无限长，滑动面深度不变，滑动面平行于坡面，并将其视为一维模型（见图 10）。

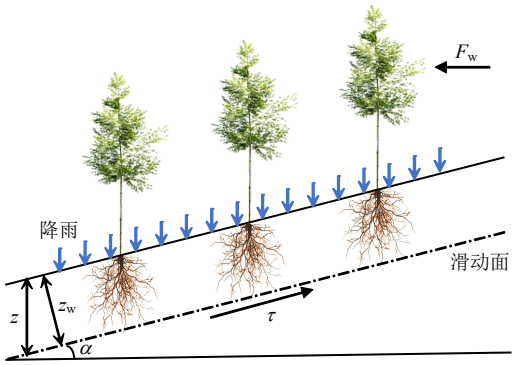


图 10 无限边坡模型示意图

Fig.10 Schematic diagram of infinite slope model

无限边坡的稳定性系数 F_s 采用 Mohr-Coulomb 失稳准则进行计算[30]，其计算公式如下：

$$F_s = \frac{c' + (\gamma_s - \gamma_w)z\cos^2\alpha\tan\varphi'}{\gamma_s z\cos\alpha\sin\alpha} \tag{14}$$

式中：c'为有效黏聚力；φ' 为有效内摩擦角；γ_s 为土的饱和重度；γ_w 为水的重度；z 为滑面深度。

Zhuang 等[31]将风荷载及植物根系加固作用视作均匀分布荷载作用于斜坡上，其中风荷载作用仅作为下滑力的一部分。然而，研究区斜坡坡度约 20º～40º，斜坡上树木受到的风荷载并作用在斜坡上时应分解在潜在滑动面上，因此，结合研究区实际情况对式（14）进行了修正，将风荷载的作用进行了分解，并结合 Green-Ampt 入渗模型，即 $z = z_w/\cos\alpha$，进一步研究风–雨–植被协同作用下斜坡稳定性响应规律，使其更加符合实际工况。风荷载 F_w 按照式（1）～（3）进行计算，则修正后无限斜坡稳定性具体计算公式如下：

$$F_s = \frac{c' + c_r + \left[(\gamma_s - \gamma_w)z_w\cos\alpha - F_w\sin\alpha/L\right]\tan\varphi'}{\gamma_s z_w\sin\alpha + F_w\cos\alpha/L} \tag{15}$$

式中：c_r 为根系附加黏聚力；L 为植株平均间距。

本文假定含根区与素土区的交界面为假定滑动面。依据现场调查结果，土坡坡度为 23º。其次，根据现场调查取样及室内土工试验，确定了滑坡岩土体的物理力学参数。由现场监测获得的体积含水率和对应基质吸力，利用 Van Genuchten 模型（简称 VG 模型）进行反演获得土–水特征曲线参数。土体物理力学参数及 VG 模型参数如表 2 所示。

表 2 土体基本参数

Table 2 Basic soil parameters

土体物理力学参数			VG 模型参数			
γ_d/(kN·m^{-3})	c'/kPa	φ'/(º)	θ_s	θ_r	a	m
14.8	20.1	23.5	0.471	0.230	2.553	0.118 4

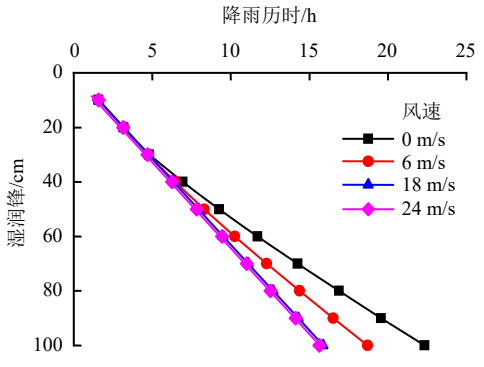
注：γ_d 为土的干重度；a 和 m 为 VG 模型曲线形状参数。

4.2 计算结果分析

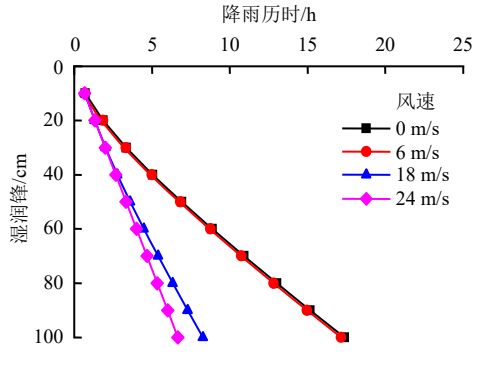
4.2.1 研究区不同风速、降雨强度下的降雨入渗分析

图 11 所示是不同风速、不同降雨强度下湿润锋的迁移过程时变规律曲线。图 12 所示是不同降雨强度下湿润锋到达假定滑动面所需时间与风速变化之间的关系曲线。由图可见，在不同风速情况下，随着风速增加，土体渗透系数也相应提高，从而导致土体湿润锋的迁移速度加快。同时，随着降雨强度和风速的增大，湿润锋到达交界面所需时间也逐渐缩短。

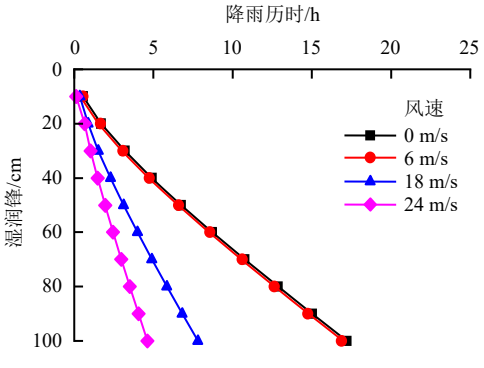
在降雨强度为 30 mm/h 的情况下，随着风速的增加，湿润锋到达交界处所需要的时间由 22.33 h 缩短至 15.87 h，缩短了 28%，整体变化幅度较为平稳，呈现出前期下降快后期下降慢的趋势，其原因在于随着风速的增大，土体渗透系数增大，坡体积



(a) 降雨强度为 30 mm/h



(b) 降雨强度为 60 mm/h



(c) 降雨强度为 120 mm/h

图 11　不同降雨强度下的湿润锋迁移过程

Fig.11　Migration process of wetting front under different rainfall intensities

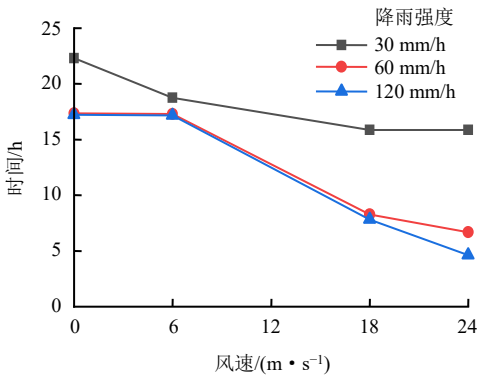


图 12　湿润锋到达假定滑动面所需时间与风速的关系曲线

Fig.12　Curves of time required for wetting front to reach sliding surface versus wind speed

水入渗模式出现的时间变晚。随着渗透系数的进一步增大，会出现降雨强度小于坡体渗透系数的情况，此时坡体入渗到交界面位置的过程中始终处于非积水入渗模式。在该模式下，坡体的入渗速率只与降雨强度有关，对风速增加不敏感，所以出现在 18 m/s 和 24 m/s 风速下，曲线高度重合的情况。

在降雨强度为 60 mm/h 的情况下，随着风速增大，湿润锋到达交界处所需要的时间由 17.36 h 缩短至 6.67 h，缩短了 62%；而在 120 mm/h 的降雨强度下，湿润锋到达交界处所需要的时间由 17.21 h 缩短至 3.96 h，缩短了 77%，这表明降雨强度对湿润锋的迁移速度影响非常大。从降雨强度 60、120 mm/h 的曲线中可以看出，风速对湿润锋迁移速度的影响较小，而降雨强度对其的影响较大，主要原因在于风速大于 12 m/s 时，土体渗透系数在风荷载扰动的作用下迅速增大。强降雨情况下，0～12 m/s 风速范围内为非积水–积水入渗模式，湿润锋迁移速率变化趋势相近，曲线高度重合，而 12～24 m/s 风速范围内则转化为非积水入渗模式，进而表现出降雨强度对湿润锋迁移速度的影响增大的规律。

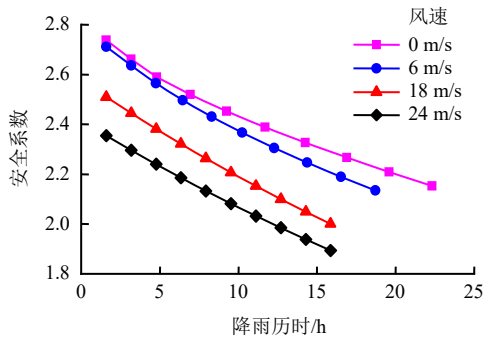
在风、雨共同作用下，风速是影响土体入渗能力的关键因素。在风速较小情况下，不同降雨强度的湿润锋迁移速度大致相同；在风速较大的情况下，不同降雨强度下的湿润锋迁移速度都大幅上升，但趋势基本相同。

4.2.2　考虑风–雨–植被协同作用下斜坡稳定性分析

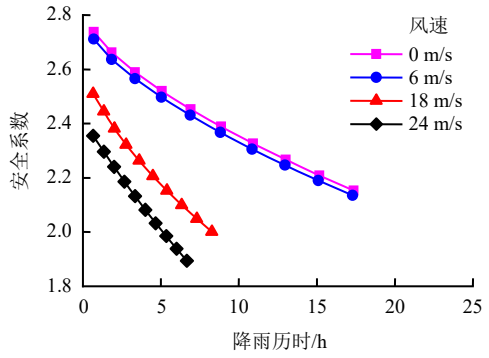
图 13 为不同降雨强度下斜坡稳定性安全系数历时变化规律曲线。可见：在相同降雨强度、不同风速的情况下，斜坡的稳定性系数随降雨历时下降的趋势大致相同，但下降速率随着风速的增加而增大，这与湿润锋的迁移速度具有高度的相关性，这是由于随着风速增大，土体受扰动程度增加，土体渗透系数随之增大，导致湿润锋迁移速率加快，土体快速饱和，从而使斜坡稳定性系数下降速率加快。

在不同的风速作用下，斜坡的稳定性在初始时间上就呈现出明显的差异。这种现象主要是由于强风所施加的风荷载对植被的影响程度各异，进而转化为对坡体产生不同的下滑力。风速越大，传入坡体中的风荷载越大，斜体下滑力提高越多，斜坡的稳定性系数下降越多。因此，斜坡在初始时间上的稳定性系数就会因风速的不同而呈现差异。

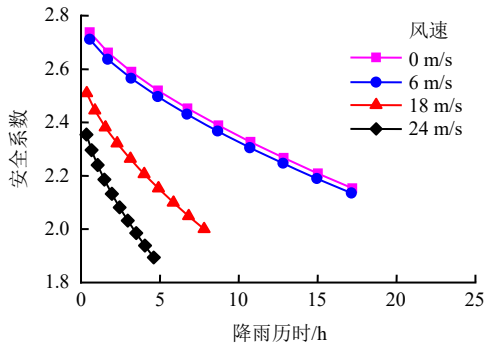
在不同降雨强度和不同风速下，斜坡稳定性系数随着降雨历时的增加而降低。虽然降雨强度和风速不同，但是斜坡稳定系数的降低幅度基本相同，这是因为除了初始风速造成的风荷载影响外，强风



(a) 降雨强度为 30 mm/h



(b) 降雨强度为 60 mm/h



(c) 降雨强度为 120 mm/h

图 13 不同降雨强度下斜坡稳定性安全系数历时变化曲线
Fig.13 Time-varying curves of safety factor under different rainfall intensities

主要对土体产生扰动，影响土体的渗透系数。土体渗透系数的变化会影响斜坡渗流场，渗透系数越大，雨水入渗越快，斜坡土体也饱和得越快，导致斜坡稳定性安全系数的下降越快。当滑动面以上的土体全部饱和时，土坡的稳定性系数下降到最低。土体的渗透性能只会影响滑体饱和速度的快慢，而不会影响稳定性系数的最终降低程度。

综上所述，对于台风暴雨型滑坡，风速是改变斜坡稳定性的关键因素。一方面，风荷载通过植被传入坡体，导致斜坡的下滑力提高，安全系数降低；另一方面，滑坡体降雨入渗过程是一个非饱和—饱和的渗流过程，降雨水分下渗过程中，土壤被湿润的先头部位与相对干土层形成明显的交界面，即湿润锋[12]。在湿润锋处，土壤含水率梯度较大，而风施加在植被上的风荷载使得植被摇曳，导致根土区松动变形，土体渗透性能提高，优势渗流使得土坡湿润锋迁移速度提高了 60%～80%，一定深度范围内的土体加速达到饱和。而降雨引发的土体内基质吸力降低与饱和度升高削弱了土体自身抗剪强度，从而使滑坡稳定性系数产生大范围波动[13-14]。因此，台风暴雨作用下，风荷载通过植被增大根区土降雨入渗湿润锋迁移速度，是台风暴雨型滑坡孕灾、成灾的重要环节，对于滑坡稳定性降低甚至失稳至关重要。

5 结 论

以福建省永泰县洋斜滑坡为研究对象，通过对斜坡上的毛竹进行拉力试验以及对根土复合体进行单环入渗试验，结合 Green-Ampt 入渗模型和无限边坡模型，研究在台风暴雨作用下植被土坡的稳定性响应规律及其稳定性分析方法。得到以下主要结论：

（1）毛竹能承受的极限风速随着毛竹胸径的增大而增大，极限风速主要在 18～30 m/s 的范围，对应 8～11 级风力范围，若台风到达该研究区时中心风力保持在 12 级及以上，则会引起研究区毛竹发生掘根现象，掘根而产生的大空洞以及毛竹摇曳和根系断裂引起的土体扰动会使得雨水快速下渗。

（2）不同风速下土体入渗趋势基本相似，但风速越大，毛竹迎风区土体扰动越大，渗透系数增加越大。在 0～12 m/s 的风速范围内渗透系数变化非常小，在 12～24 m/s 风速范围内渗透系数迅速增大。

（3）湿润锋的迁移速度随着风速和降雨强度的增加而增加。风速扰动土体对入渗的影响主要在于加快了湿润锋的迁移速度。在风速较小情况下，不同降雨强度的湿润锋迁移速度大致相同；在风速较大的情况下，不同降雨强度下的湿润锋迁移速度都大幅上升，但趋势基本相同。

（4）采用基于 VG 入渗模型并考虑风速和植被情况下的无限斜坡稳定性计算方法，进一步揭示了台风暴雨作用下，风荷载通过植被增大根区土降雨入渗湿润锋迁移速度，是台风暴雨型滑坡孕灾、成灾的重要环节。

参 考 文 献

[1] 叶龙珍, 柳侃, 黄国平, 等. 福建重大地质灾害特征及

其影响因素[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 98-102.
YE Long-zhen, LIU Kan, HUANG Guo-ping, et al. The characteristics and influencing factors of catastrophic geological disasters in Fujian Province[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2015, 26(1): 98-102.

[2] 许旭堂, 简文彬, 吴能森, 等. 降雨诱发残积土坡失稳的模型试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 270-279.
XU Xu-tang, JIAN Wen-bin, WU Neng-sen, et al. Model test of rainfall-induced residual soil slope failure[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2018, 31(2): 270-279.

[3] 姚云琦, 曾润强, 马建花, 等. 考虑优势流作用的降雨入渗边坡可靠度分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(8): 2305-2316.
YAO Yun-qi, ZENG Run-qiang, MA Jian-hua, et al. Reliability analysis of slope under rainfall infiltration considering preferential flow model[J]. **Rock and Soil Mechanics**. 2022, 43(8): 2305-2316.

[4] 廖文旺, 姬建, 张童, 等. 考虑降雨入渗参数空间变异性的浅层滑坡时效风险分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊 1): 623-632.
LIAO Wen-wang, JI Jian, ZHANG Tong, et al. Time-dependent hazard assessment of rainfall-induced shallow landslides considering the spatial variability of soil permeability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(Suppl.1): 623-632.

[5] 闫杰, 霍中刚, 李宏艳, 等. 裂隙水作用下近水平边坡渗流滑动分析及稳定性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(3): 607-614.
YAN Jie, HUO Zhong-gang, LI Hong-yan, et al. Seepage sliding analysis and stability study of sub-horizontal slope under fissure water[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2022, 39(3): 607-614.

[6] 姚茂宏, 陈铁林, 樊容, 等. 强降雨条件下考虑气压和渗流作用的边坡稳定性[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(6): 739-745.
YAO Mao-hong, CHEN Tie-lin, FAN Rong, et al. Slope stability considering the effect of air pressure and seepage under heavy rainfall conditions[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2022, 56(6): 739-745.

[7] 雷小芹, 刘恩龙, 何思明, 等. 非饱和堆积土边坡降雨−渗流潜蚀耦合过程模拟[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(2): 28-37.
LEI Xiao-qin, LIU En-long, HE Si-ming, et al. Modelling of coupled process of rainfall infiltration and internal erosion within unsaturated deposited soil slopes[J]. **Advanced Engineering Sciences**, 2021, 53(2): 28-37.

[8] 杨果林, 李亚龙, 赵天雨, 等. 降雨条件下膨胀土生态边坡湿度演化规律及稳定性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(11): 4412-4425.
YANG Guo-lin, LI Ya-long, ZHAO Tian-yu, et al. Moisture change law and slope stability analysis of expansive soil ecological slope under rainfall[J]. **Journal of Railway Science and Engineering**, 2023, 20(11): 4412-4425.

[9] ZHOU Z, SHEN J, TANG S, et al. Analysis of weakening law and stability of sliding zone soil in thrust-load-induced accumulation landslides triggered by rainfall infiltration[J]. **Water**, 2021, 13(4): 466.

[10] 姚海林, 郑少河, 李文斌, 等. 降雨入渗对非饱和膨胀土边坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1034-1039.
YAO Hai-lin, ZHENG Shao-he, LI Wen-bin, et al. Parametric study on the effect of rain infiltration on stability of unsaturated expansive soil slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(7): 1034-1039.

[11] CHO S E, LEE S R. Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration[J]. **Computers & Geotechnics**, 2001, 28(3): 185-208.

[12] 简文彬, 黄聪惠, 罗阳华, 等. 降雨入渗下非饱和坡残积土湿润锋运移试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1123-1133.
JIAN Wen-bin, HUANG Cong-hui, LUO Yang-hua, et al. Experimental study on wetting front migration induced by rainfall infiltration in unsaturated eluvial and residual soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(4): 1123-1133.

[13] 孙子涵, 王述红, 杨天娇, 等. 降雨条件下多层土坡入渗机理与稳定性分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(8): 1201-1208.
SUN Zi-han, WANG Shu-hong, YANG Tian-jiao, et al. Infiltration mechanism and stability analysis of multilayer soil slope under rainfall conditions[J]. **Journal of Northeastern**

University Natural Science, 2020, 41(8): 1201-1208.

[14] 王如宾, 夏瑞, 徐卫亚, 等. 滑坡堆积体降雨入渗过程物理模拟试验研究[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(4): 47-54.
WANG Ru-bin, XIA Rui, XU We-ya, et al. Study on physical simulation of rainfall infiltration process of landslide accumulation body[J]. **Advanced Engineering Sciences**, 2019, 51(4): 47-54.

[15] 毛正君, 张瑾鸽, 毕银丽, 等. 紫花苜蓿对黄土边坡浅层破坏防护时间效应的数值分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(15): 72-83.
MAO Zheng-jun, ZHANG Jin-ge, BI Yin-li, et al. Numerical analysis of protection time effect on planting alfalfa in loess slope with shallow failure[J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 2022, 38(15): 72-83.

[16] 李珍玉, 欧阳淼, 肖宏彬, 等. 基于根系构型的调控提高植物边坡根系固土能力[J]. 岩土力学, 2021, 42(12): 3271-3280.
LI Zhen-yu, OUYANG Miao, XIAO Hong-bin, et al. Improvement of slope soil consolidation capacity of plant root system based on regulation of root architecture[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(12): 3271-3280.

[17] 黄建坤, 王学林, 及金楠, 等. 基于渐近均匀化理论的黄土高原草本植物固土效果模拟[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 168-176.
HUANG Jian-kun, WANG Xue-lin, JI Nan, et al. Numerical simulation of root reinforcement for herbs in Loess Plateau based on asymptotic homogenization theory[J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 2020, 36(9): 168-176.

[18] 陈晋龙, 李锦辉, 程鹏, 等. 植被作用下土质覆盖层渗透特性的现场试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 222-228.
CHEN Jin-long, LI Jin-hui, CHENG Peng, et al. Field test on seepage performance of soil cover with different types of vegetation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(1): 222-228.

[19] 吴宏伟. 大气−植被−土体相互作用: 理论与机理[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 1-47.
CHARLES Wang-Wai Ng. Atmosphere-plant-soil interactions: theories and mechanisms[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(1): 1-47.

[20] 程鹏, 李锦辉, 宋磊. 生态边坡的水力和力学特性分析: 试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(10): 1901-1907.
CHENG Peng, LI Jin-hui, SONG Lei. Hydraulic and mechanical characteristics of ecological slopes: experimental study[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**. 2017, 39(10): 1901-1907.

[21] RUEL J C. Factors influencing windthrow in balsam fir forests: from landscape studies to individual tree studies[J]. **Forest Ecology & Management**, 2000, 135(1-3): 169-178.

[22] CANNON J B, BARRETT M E, PETERSON C J. The effect of species, size, failure mode, and fire-scarring on tree stability[J]. **Forest Ecology & Management**, 2015: 356, 196-203.

[23] 关德新, 朱廷曜, 韩士杰. 单株树的阻力系数模式[J]. 林业科学, 2001(6): 11-14.
GUAN De-xin, ZHU Ting-yao, HAN Shi-jie. Theoretical model of drag coefficient of isolated tree[J]. **Scientia Silvae Sinicae**, 2001(6): 11-14.

[24] COUTTS M P. Root architecture and tree stability[J]. **Plant and Soil**, 1983, 71(1-3): 171-188.

[25] PETERSON C J, CLAASSEN V. An evaluation of the stability of quercus lobata and populus fremontii on river levees assessed using static winching tests[J]. **Forestry London Oxford University Press**, 2013, 86(2): 201-209.

[26] BLACKWELL P G, RENNOLLS K, COUTTS M P. A root anchorage model for shallowly rooted sitka spruce[J]. **Forestry**, 1990, 63(1): 73-91.

[27] LUNDSTRM T, JONSSON M J, KALBERER M. The root-soil system of Norway spruce subjected to turning moment: resistance as a function of rotation[J]. **Plant & Soil**, 2007, 300(1-2): 35-49.

[28] CHEN L, YOUNG M H. Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces[J]. **Water Resources Research**, 2006, 42(7): 2005WR004468.

[29] MEIN R G, LARSON C L. Modeling infiltration during a steady rain[J]. **Water Resources Research**, 1973, 9(2): 384-394.

[30] ZHANG J, LI J. A comparative study between infinite slope model and Bishop's method for the shallow slope stability evaluation[J]. **European Journal of Environmental and Civil Engineering,** 2021, 25(8): 1503-1520.

[31] ZHUANG Y, XING A, JIANG Y, et al. Typhoon, rainfall and trees jointly cause landslides in coastal regions[J]. **Engineering Geology**, 2022, 298: 106561.