Study on the Impact of Vegetation on Landslides under Heavy Rainfall Conditions: A Case Study of Chinese Fir Forests in Sisui Town

Pingxin Wei [1], Qinghua Gong [2], Shaoxiong Yuan [2,*], Jun Wang [2], Zhihua Zhou [1], Bowen Liu [2], Jingye Chen [2]

[1] *Institute of Geo-Environment Monitoring of Guangdong Province, Guangzhou 510510, China*
[2] *Guangzhou Institute of Geography//Guangdong Open Laboratory of Geospatial Information Technology and Application, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China*
[*] *Corresponding author. Email: yuanshx@gdas.ac.cn*

ABSTRACT

Landslides are common geological disasters in southern mountainous regions, and vegetation has a dual effect on slope stability: root systems can reinforce soil and enhance shear strength; however, canopy interception of rainfall increases soil moisture content, potentially reducing shear strength. This study investigates the mechanisms by which vegetation influences landslide risk under heavy rainfall conditions, taking the landslide event in Sisui Town, Pingyuan County, Guangdong Province on June 16, 2024, as an example. By comprehensively analyzing the spatial distribution of landslide sites, vegetation types, soil characteristics, and rainfall data, we focus on the impact of Chinese fir (Cunninghamia lanceolata) plantations on landslide occurrence. Results indicate that despite high vegetation coverage, landslides frequently occur in areas densely populated with Chinese fir forests. Chinese fir is a shallow-rooted species lacking a prominent taproot, with roots mainly distributed in the surface soil layer, providing limited reinforcement to deeper soil. Under heavy rainfall, the canopy of Chinese fir intercepts large amounts of precipitation, increasing soil saturation. The shallow root system cannot offer sufficient anchoring force, leading to trees sliding along with root-soil complexes during landslides. The study reveals the significant influence of vegetation types and root characteristics on landslide occurrence, highlighting that large-scale monoculture plantations in landslide-prone areas may reduce ecosystem stability and increase landslide risk. The findings provide scientific evidence for landslide risk assessment and mitigation in Sisui Town and similar regions, offering important theoretical and practical implications for optimizing mountainous land-use planning, improving vegetation configuration, and enhancing landslide early warning capabilities.

Keywords(Bold): *Landslide, Vegetation, Heavy Rainfall, Chinese-fir, Sisui Town*

强降雨条件下植被对滑坡的影响研究——以泗水镇杉木林为例

魏平新 [1], 宫清华 [2], 袁少雄 [2,*], 王 钧 [2], 周志华 [1], 刘博文 [2], 陈敬业 [2]

[1] *广东省地质环境监测总站，广州 510510*
[2] *广东省科学院广州地理研究所//广东省地理空间信息技术与应用公共实验室，广州 510070*
[*] *通讯作者. 电子邮箱：yuanshx@gdas.ac.cn*

© The Author(s) 2025
S. Qiao et al. (eds.), *Proceedings of the 11th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention (RAC 2024)*, Advances in Economics, Business and Management Research 367,
https://doi.org/10.2991/978-94-6463-946-9_33

摘要

滑坡是南方山区常见的地质灾害，植被对坡体稳定性具有双重作用：根系可加固土体，增强抗剪强度；但冠层截留降雨，增加土壤含水量，可能降低抗剪强度。本研究以 2024 年 6 月 16 日广东省平远县泗水镇滑坡事件为例，探讨强降雨条件下植被对滑坡风险的影响机制。通过综合分析滑坡点的空间分布、植被类型、土壤特性及降雨数据，重点研究了杉木（Cunninghamia lanceolata）人工林对滑坡发生的影响。结果表明，尽管植被覆盖度较高，滑坡仍频发于杉木林密集分布区域。杉木为浅根系树种，无明显主根，根系主要分布于土壤表层，对深层土体加固作用有限。在强降雨条件下，杉木冠层截留大量降雨，增加土壤饱和度，浅根系无法提供足够的锚固力，导致滑坡发生时树木连同根土复合体一起滑动。研究揭示了植被类型和根系特征对滑坡发生的显著影响，指出在滑坡易发区域，单一树种的大面积种植可能降低生态系统稳定性，增加滑坡风险。研究结果为泗水镇及类似地区的滑坡风险评估和防治提供了科学依据，对优化山区土地利用规划、改善植被配置、提高滑坡预警能力具有重要的理论和实践意义。

***关键字**：滑坡，植被，强降雨，杉木，泗水镇*

1. 引言

滑坡是一种常见的地质灾害，对山区经济和社会发展造成严重影响。它不仅直接威胁人民生命财产安全，还会破坏基础设施，阻断交通，影响农业生产和生态环境[1]。在我国南方山区，由于地形地貌复杂，地质构造活跃，加之降雨集中，滑坡灾害频发，已成为制约当地可持续发展的重要因素之一[2]。

泗水镇地处广东省梅州市平远县山区，属典型的亚热带季风气候，年降雨量丰沛但分布不均。该地区地质条件复杂，岩土体风化强烈，加之人类工程活动频繁，滑坡灾害多发，严重影响当地经济社会发展和居民生活。2024 年 6 月 16 日，泗水镇遭遇强降雨，引发多处滑坡，造成重大经济损失和社会影响，凸显了该地区滑坡防治的紧迫性和重要性。

植被对坡体稳定性具有双重作用。一方面，植被根系能够加固土壤，增强土体抗剪强度，提高坡体稳定性[3]。另一方面，植被冠层截留降雨，增加土壤含水量，可能降低土体抗剪强度，提升滑坡风险[4]。特别是在强降雨条件下，这种双重作用更加明显，需要深入研究以明确植被对滑坡风险的综合影响[5]。

杉木（Cunninghamia lanceolata）是泗水镇及周边地区广泛种植的重要经济林树种。由于其生长快速、适应性强，在当地山坡地带大面积种植[4]。然而，杉木深根系和高覆盖度的特点，可能在强降雨条件下对滑坡风险产生特殊影响，值得深入探讨。

本研究以 2024 年 6 月 16 日泗水镇滑坡事件为研究对象，旨在探究植被在强降雨条件下对滑坡风险的影响机制。通过综合分析滑坡点的空间分布、植被类型、土壤特性以及降雨数据，深入研究不同植被类型，特别是杉木林对滑坡发生的影响。

研究结果将有助于揭示植被-降雨-滑坡之间的复杂关系，为泗水镇及类似地区的滑坡风险评估和防治提供科学依据。同时，本研究对于优化山区土地利用规划、改善植被配置、提高滑坡预警能力等方面具有重要的理论和实践意义。

2. 研究区概况

2.1 地理位置与气候特征

泗水镇位于广东省梅州市平远县的东北部（图 1），地理坐标约为东经 115.99°～116.12°、北纬 24.67°～24.86°，毗邻福建省，是粤东北山区的重要枢纽。该区属亚热带季风气候，四季分明，雨热同期，年平均气温约 19.0℃～19.5℃，年降雨量约 1,700 毫米。降水主要集中于 4 月至 9 月的雨季，尤以 5—6 月最为强烈，常出现连续强降雨，极易诱发洪涝与地质灾害。季风影响显著，夏季东南季风带来高温多雨，冬季西北季风则较为温和少雨。整体气候湿润，降雨的时空分布差异大，对区域生态与地质环境具有重要影响。

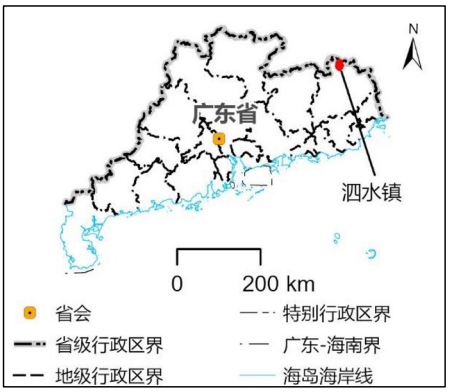

图 1 泗水镇地理位置示意图

2.2 地质地貌与土壤特性

泗水镇地质复杂，以古老变质岩和花岗岩为主，岩性多样，包括片麻岩、千枚岩、砂岩、页岩等。断裂、褶皱等构造活动频繁，使岩体破碎、风化强烈，为地质灾害提供了不利条件。地貌类型以山地和丘陵为主，地势北低南高，海拔 140～950 米不等，地形起伏较大（图 2），河谷地带相对平坦。土壤主要为红壤和黄壤，层厚不均且多显浅薄，质地以砂壤土和壤土为主，渗透性强但抗剪强度低，易受强降雨影响发生侵蚀和滑坡。整体土壤肥力受降雨侵蚀影响较大，生态环境较为脆弱。

2.3 植被状况

泗水镇森林覆盖率高，主要植被类型包括常绿阔叶林、针叶林及针阔混交林，同时大面积发展人工经济林。杉木（Cunninghamia lanceolata）人工林成为地域森林资源的重要组成，对地方经济贡献显著。杉木根系对土壤有一定加固作用，但高密度、单一化种植导致生物多样性下降，对生态系统稳定性产生负面影响。天然林主要分布于偏远山区，面积较小。遥感与调查数据显示，泗水镇森林覆盖率约为 89%，杉木林在人工林中占比最大，体现出区域林业结构的特色与矛盾。

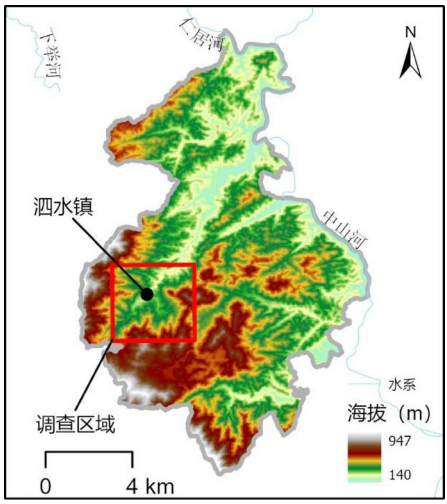

图 2 泗水镇地形地貌图

2.4 2024 年 6 月 16 日强降雨事件

2024 年 6 月 16 日，泗水镇遭遇极端强降雨，受季风与副热带高压共同影响，24 小时降雨量达 250 毫米，局部超 300 毫米，属特大暴雨级别。此次降雨持续超过 36 小时，强度大、范围广，导致土壤长期饱和，区域洪涝和滑坡风险骤增。与历史同期相比，此次降雨量和持续时间均创下极值，重现期超过 50 年一遇（表 1）。极端降雨不仅造成河流水位暴涨和灾害发生，也对区域生态与地质安全构成严峻挑战，显示出该地面对极端气候事件的高脆弱性。

表 1 2014 年至 2024 年泗水镇最大日降雨量

年份	最大日降雨量（毫米）
2014	112
2015	61
2016	95
2017	65
2018	60
2019	123
2020	167
2021	82
2022	137
2023	154
2024	336

通过表 1 可以看出，2024 年的最大日降雨量远超前十年的最高纪录，凸显了此次强降雨的异常性和极端性。

3. 滑坡灾害调查与分析

3.1 滑坡事件概况

本次调查区域中，共记录滑坡点 288 处（图 3）。中型滑坡 44 处，占滑坡总数的 15.3%；小型滑坡 244 处，占滑坡总数的 84.7%。所有滑坡类型均为浅层滑坡，滑坡深度一般小于 5m。

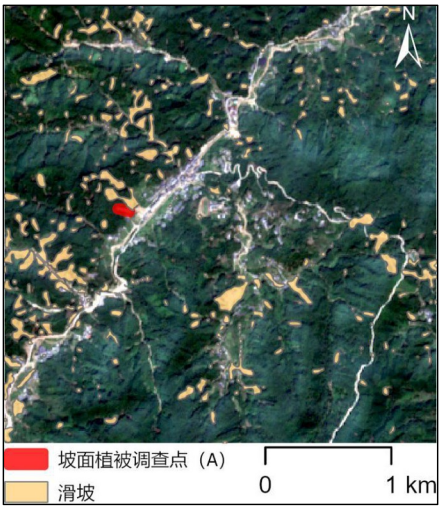

图 3 2024 年泗水镇调查区滑坡分布

滑坡的面积范围从 62.5 平方米（最小）至 31,355.43 平方米（最大）不等，体积范围介于 125.00 立方米至 62,710.86 立方米之间。中型滑坡的面积一般在 5,000 平方米以上，体积较大，破坏力更强，对周边环境、民居和基础设施构成较大威胁。而小型滑坡的面积多在 5,000 平方米以下，虽然单体规模较小，但由于数量众多，累积效应不可忽视，对区域生态环境和居民生活产生一定影响。

从空间分布来看，滑坡点主要集中于坡度较大、地形陡峻的山地丘陵地区。这些区域岩土体结构松散，土层较薄，抗剪强度低，在强降雨条件下，土体含水量迅速增加，极易诱发浅层滑坡。此外，植被覆盖情况与滑坡的发生密切相关，部分滑坡区域植被茂密，尤其是在杉木林分布区域，表明植被类型可能对滑坡的发生有一定影响。

3.2 坡面植被概况

对坡面植被调查点（A）进行了树木类型、胸径、树高等进行调查（图 3、表 2）。调查共记录了 20 株树木，主要树种为杉木（*Cunninghamia lanceolata*）和马尾松（*Pinus massoniana*），其中杉木 14 株，占总数的 70%；马尾松 5 株，占总数的 25%；其余为荷木（*Schima superba*）等阔叶树种。

表 2 点 A 坡面植被抽样调查表

树种	树高（m）	胸径（cm）	估计树龄（年）
马尾松	21	37.9	40
杉木	12.8	18.3	25
杉木	15.8	18.5	25
杉木	16.5	26.4	30
杉木	15	21.9	25
马尾松	25.3	31.5	40
马尾松	23.3	33.1	40
杉木	13.3	11.8	25
杉木	14	22.8	20
杉木	11.5	12.1	20
杉木	12	10.5	25
杉木	13.7	17	35
阔叶树	17.9	26.5	35
马尾松	24.8	38.2	45
荷木	15.7	29.3	35
阔叶树	21	26	35
杉木	14	16.4	25
杉木	16.1	23.1	25
杉木	14.6	14.7	20
杉木	15.5	17.6	25

杉木的树高范围在 11.5 米至 16.5 米之间，平均树高约 14.3 米；胸径介于 10.5 厘米至 26.4 厘米，平均胸径约 18.0 厘米；估计树龄主要集中在 20 至 30 年之间。马尾松的树高介于 21 米至 25.3 米之间，平均树高为 23.7 米；胸径在 31.5 厘米至 38.2 厘米之间，平均胸径约 34.7 厘米；估计树龄均在 40 至 45 年。荷木等阔叶树种的树高为 15.7 米，胸径 29.3 厘米，树龄约 35 年。

从植被结构来看，坡面植被以针叶林为主，且以中龄林为主，树龄集中在 20 至 35 年。杉木林密度较高，生长旺盛，树冠茂密。但杉木为速生树种，根系相对较浅，对土壤的加固作用有限。马尾松虽为深根性树种，但数量较少，对整体坡面的加固作用不明显。此外，针叶林的冠层结构易导致降雨截留，增加土壤含水量，降低土体抗剪强度。

植被的单一性和密集度可能是滑坡发生的诱因之一（图 4）。杉木林的大面积种植，导致土壤水分增加，且由于林下植被稀少，地表缺乏植被覆盖，易引发土壤侵蚀和浅层滑动。相较之下，混交林或

阔叶林由于根系发达、土壤稳固能力强，可能更有利于坡面的稳定。

在滑坡区域，倒伏的杉木形成了明显的根土复合体，呈半椭圆形。这些杉木的根系主要分布在 1 米至 2 米深的土层内，属于浅根系（图 5）。根土复合体的形态反映出杉木根系在水平和垂直方向上扩展有限，对土体的加固作用较弱。在强降雨条件下，土壤饱和，抗剪强度降低，杉木浅层根系无法提供足够的锚固力，导致树木连同根土复合体一起滑落。

图 4 滑坡调查点 A 主要密植杉木

图 5 调查点随滑坡倒下的杉木

3.3 植被覆盖度调查

通过对滑坡点 NDVI 数据的统计分析，发现滑坡区域的植被覆盖度呈现出显著特征。NDVI 最大值大于 0.15 的滑坡点占到了 54%，大于 0.21 的占 38%，大于 0.30 的占 18%。这表明，超过一半的滑坡点具有较高的植被覆盖度，部分区域甚至达到高覆盖水平。

传统观点认为，植被覆盖度越高，坡体的稳定性越强，滑坡风险越低。然而，本次研究结果显示，在华南地区强降雨条件下，即使植被覆盖度较高的区域，滑坡仍然频发。特别是在 NDVI 最大值超过 0.21 的区域，滑坡发生率并未降低，反而呈现出一定的增加趋势。这说明高植被覆盖度并不必然降低滑坡风险。

进一步分析发现，这些高 NDVI 值的滑坡点多位于人工针叶林区域，尤其是杉木林密集分布的山坡。杉木林冠层密集，截留大量降雨，增加了土壤含水量；同时，杉木根系相对较浅，对深层土体的加固作用有限。在强降雨作用下，土体抗剪强度降低，易诱发浅层滑坡。

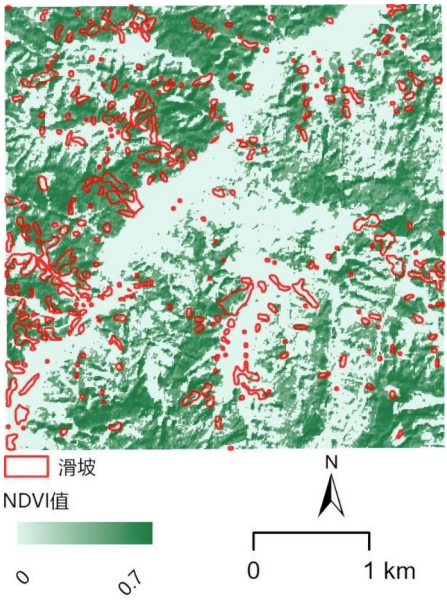

图 6 滑坡点及植被覆盖度指数分布图

4. 植被对滑坡风险的影响机制

4.1 植被的正面影响

植被对坡体稳定性的重要作用之一在于其根系能够增强土体的抗剪强度[6]。植物根系，尤其是木本植物的根系，可以深入土壤，通过机械加固和土壤改良两种方式提高土体的稳定性。根系与土壤颗粒之间形成的凝聚力和摩擦力，能够有效地抵抗剪切应力，防止土体滑动[7]。此外，根系的生长可以改善土壤结构，增加土壤的团粒结构和孔隙度，促进土壤的透气性和排水性，从而降低因积水导致的土壤软化。

大量研究表明，植被根系对于提高土体抗剪强度具有显著作用。Wu 等人（1976）通过直剪试验，证明了根系的存在能够显著提高土壤的黏聚力，建议将植被根系视为土体加固的天然“锚杆”[8]。野外实测数据也支持了这一观点，例如在坡度较大的地区，植被覆盖良好的坡面往往比裸露坡面更稳定，滑坡发生的概率更低。

另外植被能够通过减少地表径流和防止土壤流失，间接提高坡体的稳定性[9]。植被覆盖层能够截留降雨，降低雨滴对土壤的直接冲击，减少溅蚀[10]。同时，植被的枝叶和枯落物层能够减缓地表径流的流速，增加土壤的入渗量，减少地表冲刷[7]。根系还可以固定土壤颗粒，防止土壤被侵蚀和冲走。

防止土壤侵蚀对于维持坡体的结构完整性至关重要。土壤侵蚀不仅会导致土层变薄，削弱植被的生长条件，还会形成沟壑和不均匀的地形，增加坡体的不稳定性。植被的存在有助于维持土壤的厚度和均匀性，从而提高坡体的整体稳定性。

4.2 植被的负面影响

植被的冠层能够截留大量的降雨，提高土壤的湿度。在强降雨条件下，密集的植被冠层将雨水截留后，通过树干和枝叶将水分集中输送至地表，增加了局部土壤的含水量，称为冠层注入效应[11]。此外，植被减少了地表蒸发，由于树冠遮蔽，土壤中的水分更难以蒸发，从而导致土壤长时间处于高含水状态。

土壤含水量的增加会降低土体的抗剪强度。饱和的土壤中，孔隙水压力升高，土粒之间的有效应力减小，黏聚力和内摩擦角降低，土体更容易发生剪切破坏[12]。因此，在强降雨条件下，植被密集的区域可能因为土壤过度饱和而增加滑坡的风险[13]。

虽然植被根系能够加固土体，但在某些情况下，根系也可能影响土体结构，导致坡体不稳定。首先，根系的生长可能在土体中形成孔隙和裂隙，尤其是大型深根植物的粗大根系，会在土体中穿行，造成土体的不连续性[14]。这些孔隙和裂隙为水分的入渗和流动提供了通道，在强降雨过程中，加速了土壤的饱和和软化。

其次，根系的生长和死亡会导致土体结构的变化。根系死亡后，残留的根道会形成永久性的孔隙，进一步削弱土体的完整性[15]。特别是在主根系较发达的植物（如杉木）中，这种效应更加明显。

4.3 杉木林对滑坡的特殊影响

4.3.1 杉木根系特征

杉木是浅根系树种，无明显的主根，侧须根发达，根系再生力强，但穿透力弱，垂直根系缺乏主根，根系入土深度达 1.5-2m[16]。杉木的水平根系在造林初期扩张迅速，成年后根幅生长可达树冠的 1 倍左右[16]。然而，其根系主要分布于土壤的浅层区域，85%以上的细根集中在 10～60 厘米的土层中，大部分须根多集中于表土 20～30 厘米范围内。这种根系分布特征导致杉木对深层土体的加固作用有限。在坡体稳定性方面，浅根系主要增强表层土壤的抗剪强度，对深层滑动面的加固效果较弱。

在本次调查中，滑坡区域的杉木根系主要集中于表层土壤，深度约为 1～2 米，与浅层滑坡的滑动面位置相近。当强降雨导致土壤含水量增加、抗剪强度降低时，杉木浅浅的根系无法提供足够的锚固力，抵抗下滑的土体。因此，滑坡发生时，杉木往往连同根土复合体一起滑动，导致大面积的植被倒伏（图 5）。

4.3.2 杉木林的水文影响

杉木林的冠层结构密集，高度较高，叶面积指数大，具有较强的降雨截留能力[17]。在强降雨过程中，杉木冠层截留大量雨水，通过树干和枝叶将水分集中输送至地表，增加了土壤的局部含水量[16]。杉木的侧根系，特别是粗大根,会显著改变土壤孔隙度,为水分入渗提供优先流路径，导致雨水迅速渗入土壤，加剧土体的饱和程度[13]。

此外，杉木的蒸腾作用相对较弱，特别是在降雨时期，对土壤水分的吸收和消耗有限。这使得土壤中的水分难以及时被植物吸收，长期处于高含水状态，降低了土体的抗剪强度，增加了滑坡发生的风险。

4.3.3 与其他植被类型的对比

相比之下，阔叶树种或针阔混交林的根系更为发达[18]，既有深根也有浅根，能够在垂直和水平方向上更有效地加固土体[6]。阔叶树的根系通常深入土壤深层，增强了对深部土体的锚固能力。此外，混交林的林下植被较为丰富，对地表径流有更好的削减作用，能够有效降低雨水渗透速度，减少土壤饱和度[6]。

图 7 滑坡体中间的阔叶树未随坡体滑动

本次调查发现，滑坡区域中未发生滑动的部分多为阔叶树种分布区域，甚至滑坡体中的阔叶树也未随坡体滑动（图 7），这些区域的植被根系结构复杂，对土体稳定性贡献更大。这提示，在滑坡易发区域，单一的杉木纯林可能不利于坡体稳定，应考虑种植混交林或增加阔叶树种的比例，以增强植被对土体的整体加固作用。

5. 结论

本研究以广东省梅州市平远县泗水镇为例，系统分析了华南地区强降雨情境下植被对滑坡灾害风险的影响机制。结果表明，植被对滑坡风险具有双重作用：一方面，植被根系可有效加固土体、减少径流、抑制土壤侵蚀，从而提升坡体稳定性；另一方面，在强降雨条件下，植被冠层截留降水、提高土壤含水量，并降低土体抗剪强度，反而可能诱发滑坡。杉木林作为典型的浅根系人工林，对深层土体加固作用有限，且强降雨时因根系浅、锚固力弱，易随土体整体滑移，增加滑坡发生概率。NDVI 分析显示，滑坡点中高植被覆盖度区域占比超过一半，说明高覆盖度并不等同于低风险，植被类型及根系结构是影响滑坡的重要因素。鉴于此，滑坡防治应综合考虑植被类型与管理，避免单一树种大面积种植，提倡林分结构优化与混交林建设，以提升生态系统稳定性和坡体抗灾能力。

致谢

项目得到了国家自然科学基金项目（42271091; 42101084）、广东省科学院优势特色学科及技术领域建设专题（2023010104; 2022010104）和广东省自然科学基金项目（2024A1515030114; 2022A1515011898）的资助。另外感谢广东省气候中心正研级高级工程师刘尉对多年降雨数据分析的帮助和指导。

参考文献

[1] 吴益平,张秋霞,唐辉明,等. 基于有效降雨强度的滑坡灾害危险性预警[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2014, 39(07): 889-895.
Wu Yiping, Zhang Qiuxia, Tang Huiming, Xiao Wei, 2014. Landslide Hazard Warning Based on Effective Rainfall Intensity. Earth Science, 39(7): 889-895. doi: 10.3799/dqkx.2014.083

[2] Li Zhuo,Yupu Huang,Jing Zheng, et al. Landslide Susceptibility Mapping in Guangdong Province, China, Using Random Forest Model and Considering Sample Type and Balance[J]. Sustainability, 2023, 15: 9024.

[3] Ruwaida Zayadi, Zaenal Kusuma, Amin Setyo Leksono and Bagyo Yanuwiadi, The Influence of Vegetation Roots on Slope Stability in Landslide Susceptible Areas. International Journal of Civil Engineering and Technology, 11(4), 2020, pp. 124-133.

[4] 黄志文. 平远县生态公益林补偿存在的问题及对策[J]. 绿色科技, 2017, (09): 159-160.
Huang, Z. W., Problems and Countermeasures in the Compensation of Ecological Public Welfare Forests in Pingyuan County. Journal of Green Science and Technology, 2017, (09): 159-160.

[5] 陈敬业,王钧,宫清华,等. 植被增渗效应对花岗岩残积土浅层滑坡的影响机理研究[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(03): 115-124.
CHEN Jingye, WANG Jun, GONG Qinghua, et al. Influence mechanism of vegetation infiltration effect on shallow landslides of granite residual soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 115-124. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202205054

[6] 路艳宾,彭尔瑞. 根系提高土体抗剪强度研究进展[J]. Hans Journal of Soil Science 土壤科学, 2022, 10(4): 182-188.
Lu, Y. B., Peng, E. R., Progress of Research on Root System to Improve Shear Strength of Soil. Hans Journal of Soil Science, 2022, 10(4): 182-188.

[7] 肖涛,李萍,侯艺飞,等. 植被护坡研究综述[C]//2019 年全国工程地质学术年会论文集, 2019: 388-394.
XIAO Tao, LI Ping, HOU Yifei, LIU Yimin. 2019: REVIEW ON THE VEGETATION SLOPE PROTECTION TECHNOLOGY. JOURNAL OF ENGINEERING GEOLOGY, 27(s1): 379-385.

[8] T. Wu, W. McKinnell III, D. Swanston. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16(1): 19-33.

[9] Parlak,Mehmet,Parlak, et al. Measurement of splash erosion in different cover crops[J]. Turkish Journal of Field Crops, 2010, 15(2): 169-173.

[10] Haregeweyn,Nigussie,Tsunekawa, et al. Soil erosion and conservation in Ethiopia: a review[J]. Progress in Physical Geography, 2015, 39(6): 750-774.

[11] Wang A, Pei T, Jin C, Guan D. [Estimation of rainfall interception by broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountains]. Ying Yong Sheng Tai Xue Bao. 2006 Aug;17(8):1403-7. Chinese. PMID: 17066692.

[12] 周鑫隆,胡开梦,顾凯,等. 植被护坡作用下边坡土壤水分时间稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(11): 2357-2366.
ZHOU Xinlong, HU Kaimeng, GU Kai, XIAO Henglin, TAO Gaoliang, SHI Yunfeng. Temporal stability of soil moisture under slope protection by vegetation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(11): 2357-2

[13] Hu Jiang,Qiang Zou,Bin Zhou, et al. Estimation of Shallow Landslide Susceptibility Incorporating the Impacts of Vegetation on Slope Stability[J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2023, 14(4): 618-635.

[14] Norris,Joanne E,Stokes, et al. Slope stability and erosion control: ecotechnological solutions[M]: Springer Science \& Business Media, 2008.

[15] Stokes,Alexia,Sotir, et al. Soil bio-and eco-engineering in China: past experience and future priorities[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(3): 247-257.

[16] 闫小莉,林智熠,胡文佳,等. 杉木根系形态特征及其觅养策略研究进展[J]. 世界林业研究, 2022, 35(01): 26-31.
Yan Xiaoli, Lin Zhiyi, Hu Wenjia, Ma Xiangqing, Qu Luping. Root Morphological Characteristics of Cunninghamia lanceolata and Its Foraging Strategies[J]. WORLD FORESTRY RESEARCH, 2022, 35(1): 26-31

[17] 伍倩,闫文德,赵亮生,等. 湖南会同杉木人工林林冠截留特征[J]. 生态学报, 2016, 36(13): 4131-4140.
WU Qian, YAN Wende, ZHAO Liangsheng, DENG Xiangwen, NING Chen, XIANG Wenhua. Canopy interception characteristics of Chinese fir plantations in central south China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(13): 4131-4140.

[18] 陈钰馨,郑博福,傅赫,等. 不同植被类型根系对土壤水分分布的影响[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2023, 21(01): 37-46.
CHEN Yuxin, ZHENG Bofu, FU He, LUO Chengkang, JIANG Yihui, ZHU Jinqi. Effects of roots in different vegetation types on soil water distribution[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(1): 37-46.

Open Access This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.