

# 林业工程与水土保持协同设计对地质灾害治理边坡防护

邓洪伟

广西工勘岩土工程有限公司 广西 桂林 541100

**【摘要】**：地质灾害边坡防护是山地灾害防治中的重点。本文以林业工程设计与水土保持技术的协同为研究对象，探讨二者在边坡防护中的协同性。研究了植物根系固土机理与水文效应，分析了乔灌草立体配置、三维植被网护坡和边坡生态修复等主要林业工程措施的水土保持效果。对两个典型工程的治理数据进行对比和增加不同护坡方式的监测数据表，验证了协同设计能够有效降低土壤侵蚀率、增加植被覆盖和减少径流产沙量。研究表明，林业工程与水土保持协同设计能够形成“工程护坡为骨架、植被固土为核心”的地质灾害边坡防护体系，可为地质灾害边坡治理提供兼顾生态安全、工程稳定的途径。

**【关键词】**：林业工程；水土保持；协同设计；地质灾害；边坡防护

DOI:10.12417/2811-0528.26.13.065

## 引言

地质灾害边坡防护一直以来都以混凝土挡墙、抗滑桩、锚杆等刚性工程形式，而单纯使用硬质工程结构除了造价高，并且在长期工程使用中存在材料老化、排水失灵等问题，难以从根本上解决边坡失稳的根本问题。近年来，随着生态文明建设的不断深入，林业工程和水土保持技术被系统地引入边坡防护领域。中国工程院院士尹伟伦在学术报告中系统介绍了植物根系对水土保持和灾害防治的重要作用，并结合实验和调研数据阐述了其在边坡治理和泥石流防治等方面的应用价值。林业工程利用植被恢复和生物护坡完成边坡表层的加固，水土保持技术通过截排水、拦沙蓄水等工程手段控制坡面水文过程，通过林业工程与水土保持协同设计形成功能互补的综合防护体系。但是，现实生活中在林业工程与水土保持的协同关系中，林业工程与水土保持往往割裂植被配置忽视坡面水文条件，水土保持工程设计又缺乏植物生长的立地依据，探索林业工程与水土保持协同设计路径，有助于提高地质灾害边坡防护的科学性和有效性。

## 1 林业工程与水土保持协同设计的内涵与机理

### 1.1 协同设计的概念内涵与技术框架

林业工程与水土保持协同设计是指在边坡防护工程中，将植物护坡的生态功能和水土保持措施的工程功能进行整合，形成“工程护坡为骨架、植被固土为核心”的防护方式。这种“先工程后绿化”的设计观念突破了以往“先工程后绿化”的思维定式，从设计阶段就体现出林业措施和水土保持措施的功能耦合。从技术层面来说，协同设计有三个层次整合。一是空间层面的协同，即依据边坡地形地貌特征合理组织工程结构和植被带，形成“坡顶截水林带—坡面固土灌草带—坡脚拦沙林带”的立体防护体系；二是时序层面的协同，工程护坡可为植被提供初期稳定条件，在植物根系发育成熟后反作用于工程结构，

增强长期稳定性。三是功能层面的协同，水土保持截排水设施减少坡面冲刷和为植被生长提供适宜水分条件；植被覆盖能减少地表径流、降低泥沙输移，降低排水设施荷载，多维协同关系构成协同设计的技术框架。

### 1.2 植物根系固土的力学机制与水文效应

植物根系在边坡稳定中的作用。从力学机理上看，根系可以通过加固土体的三种途径，一是根系在土体中形成网状结构，提高根土复合体抗剪强度；二是深根系锚固作用将浅层土体锚固到深层稳定地层，三是须根加筋使土体从松散状态转变为有一定凝聚力的整体。研究表明，草本植物根系可以延长边坡稳定的时间，减轻边坡破坏，起到较好的水土保持作用。在强水淹胁迫重点风险区，应优先引进深根系优势物种对岸坡失稳缓解；而水位扰动频率小区，可优化物种丰富度和多样性来加强浅层土壤加固。从水文过程来看，植物可以通过截留降雨、增加入渗、蒸腾耗水来调节坡面水文过程。植物冠层削减降雨的动能，减少雨滴对地表的溅蚀；枯落物层可以起到海绵作用，延长径流产生时间、减少径流流速。试验表明，在相同降雨强度下，灌草混合植被覆盖度提升可有效延缓坡面径流起始时间，坡面径流率和土壤侵蚀率随植被覆盖度的提高而降低，且覆盖度越高侵蚀过程越稳定。

## 2 林业工程在边坡防护中的水土保持措施

### 2.1 乔灌草立体配置与根系固土体系构建

边坡植被的配置不是简单的“见绿就配”，而是要根据不同坡段的立地条件和稳定性要求，科学配置乔、灌、草的植被，形成互补式的立体防护体系，乔木的深根系进行深层锚固，灌木的中根系加固坡面中层，草本植物具有密集的须根系进行加固浅层土体、快速覆盖地表的功能。原则上，高陡岩质边坡的配置应以灌木、草本为主，降低乔木对坡面稳定的影响，而对

土层较厚的土质边坡和堆积体边坡，可适当配置深根系乔木，形成深层锚固。宁夏农科院资环所的研究实践表明，采用埂坎植被固坡与攀缘植物立体护坡、豆科牧草混播种植技术等提高边坡植被覆盖度和固土能力，已建成核心示范面积 320 亩、推广 1077 亩。南方红壤区植物配置技术通过结合坡度和侵蚀特征形成功能互补式的生态防护体系，实现生态修复和产业发展双赢。

## 2.2 三维植被网与生态修复协同技术

三维植被网护坡是林业工程与水土保持协同设计的典型护坡技术，是由聚合物薄膜刺孔、加热、拉伸成的底层为高模量的基础层，表层为凹凸网包，立体网状结构，近 90%可填土，兼具土工网与植物护坡的优点。植物不成坪时不容易出现水土流失，能够使种子均匀分布，根系生长后与网体形成嵌锁体系，有利于增强抗张拉和抗剪强度。边坡植被覆盖率 30%以上可抵抗小雨冲刷，80%以上可抵抗暴雨冲刷。黄土高原土壤层极易受损边坡采用 3D 防冲蚀网配合土浆拌麦秆、草籽抹面，既加固边坡，又有利于草种根部生长，对于土壤层严重受损的边坡需要结合客土回填、生态泥包等立地改良技术。广东粤西一废弃花岗岩采石场采用植被混凝土生态防护方案喷播后 5~7 天即可发芽，28 天覆盖率 90%，45 天覆盖率 95%，3 个月后裸露坡面完全被植被遮挡。在水分调控上，截排水沟、蓄水池等既可以控制坡面径流，又可以为植被提供水分，工程护坡与生态护坡的有机结合。

## 2.3 坡面截排水系统与植被缓冲带的协同布局

截排水系统和植被缓冲带是边坡最有效的防护措施。截排水沟主要起集流排水作用，快速降低流速、减少冲刷时间，单独的硬质沟渠很容易造成泥沙下移淤积，可以在截水沟出口和排水沟两侧建立灌草缓冲带，利用灌木植被茎叶阻滞和根系固结作用可降低径流流速 40%~60%，拦截率达到 70%以上。试验表明，缓冲带宽 3~5 米、植被覆盖度 80%时，粗颗粒泥沙基本被拦截在坡面。工程布置截水沟间距一般为 20—50 米，视坡长、土壤类型和设计暴雨强度确定；每条截水沟下游侧应配置耐水淹、根系发达的灌木（如紫穗槐、胡枝子），禾本科草本组成宽 2 米左右的过滤带，将截水沟上排下滤，既能保证暴雨时坡面排水通畅，减少水土流失，又能为植被生长提供稳定的水分环境。据黄土高原监测，协同设计坡段年径流系数比单独截水沟下降 0.12，年土壤流失量降低 35%左右。

## 3 协同设计在边坡防护中的应用成效分析

### 3.1 典型工程协同治理模式与实测数据对比

位于黄河中游皇甫川支流区忽昌梁小流域，该地区砒砂岩遇水成泥、水土流失严重，计划在 2025 年开展小流域综合治

理治理面积 20 平方公里，采取“坡面造林+沟道拦沙”的治理模式：梁 ez 坡面植油松、柠条固土保水；支毛沟两侧植沙棘织网，沟道修铅丝石笼谷坊，层层拦蓄泥沙。位于河北省卢龙县柳河北山小流域，工程针对经济林地保水保土效果差、沟道岸坡缺少防护等问题，工程投资 1016.4 万元，通过谷坊、浆砌石护岸、干砌石田坎、蓄水池、水保林、封禁等水土保持措施，预防保护区补植油松 1.65 万株，封禁治理 2127.81 公顷；综合治理区坡改梯 8.07 公顷，新建干砌石谷坊 18 道、铅丝石笼谷坊 13 道；生态修复区浆砌石护岸 3460 米，植物保护带 600 平方米。这两个项目均通过“拦、蓄、治”立体防护体系的建设，实现了工程护坡和植被护坡的有机结合。具体数据比较见表 1。

表 1 典型小流域协同治理工程实施数据对比

指标	忽昌梁小流域	柳河北山小流域
项目投资	1000 万元	1016.4 万元
治理面积	20 km <sup>2</sup>	22 km <sup>2</sup> （治理水土流失面积）
林草覆盖率	由治理前约 50% 提升至 69.94%	由 57%提升至 70%
主要工程措施	坡面栽油松、柠条；沟道建铅丝石笼谷坊	油松补植 1.65 万株；新建干砌石谷坊 18 道、铅丝石笼谷坊 13 道；浆砌石护岸 3460m
水土流失治理度	92.66%	—
年保土量	8.62 万吨	1.37 万吨
保水量	—	45.6 万 m <sup>3</sup>

（数据来源：准格尔旗水利局、卢龙县水务局公开资料）

从表 1 中可以看出，两个案例区域环境不同，同样采用“工程拦蓄+植被恢复”的协同治理模式。忽昌梁区域为黄土丘陵沟壑区，以粗泥沙拦蓄为主，年保土量 8.62 万吨，水土流失治理度 92.66%。柳河北山区区域兼顾农田灌溉与人居改善，年保水量 45.6 万立方米，林草覆盖率提高 13 个百分点，代表协同设计在边坡生态防护领域的适用性。

### 3.2 协同设计对边坡稳定性的综合提升效应

从机理上看，协同设计综合效应由三个方面构成。在抗冲刷方面，植被覆盖与工程拦截共同作用，试验结果发现天然斜坡的降雨侵蚀峰值达到 228.133g·m<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup>，经土壤改良后降低为 14.070g·m<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup>；植被修复斜坡的侵蚀峰值下降到 8.5g·m<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup>，水凝胶-植被加固斜坡均小于 0.05g，侵蚀速率不可忽略。在排水调节方面，水土保持的截排水设施与植被的水文调节共同作用控制坡面径流，三维植被网对减少边坡土壤

水分蒸发、增加入渗量有良好作用,植被成坪后草皮与三维网以及附着泥土构成嵌锁体系进一步加强边坡表层抗冲能力。在长期稳定方面,根系固土的时变效应需要与工程结构共同作用,研究表明草本植物根系可延长边坡保持稳定时间、减少破坏程度,但为确保岸坡的长期稳定需要与其他工程结构共同作用,这也说明林业工程与水土保持协同设计的必要性,任何一种措施都不可能完全解决复杂边坡失稳问题,只有将二者合二为一,才能确保边坡防护的长期安全。

#### 4 协同设计条件下的边坡防护效益优化策略

##### 4.1 不同护坡方式协同效益的量化对比与参数优化

不同护坡方式在抗冲刷、根系固土和水文调控方面的表现存在一定差异,为了表示协同设计与单一措施的优势,参考黄土高原人工模拟降雨试验和野外监测数据总结出不同护坡方式下的关键性能参数比较表,试验条件为降雨强度1.5mm/min、持续60分钟、坡度35°。由表2可以看出,协同设计护坡方式无论从植被覆盖度(92%)、土壤侵蚀模数(68t/km<sup>2</sup>·a)、抗剪强度增量(+11.5kPa)等指标上都要优于单一措施。纯混凝土护坡虽能在短时间内实现边坡稳定,但缺乏生态功能且径流系数达0.65;单一植草覆盖度75%但根系较浅,3年后存活率仅为62%,长期稳定性差;单一水土保持工程能降低侵蚀模数180t/KM<sup>2</sup>·a,但无法完成生态恢复;协同设计将工程结构和植被体系有机结合,不仅能将土壤侵蚀模数降低到68t/km<sup>2</sup>·a(仅为单一水保工程的37.8%),并将植被存活率提高到88%。

表2 不同护坡方式边坡防护效果监测数据对比

护坡方式	植被覆盖度 (%)	径流系数	土壤侵蚀模数 (t/km <sup>2</sup> ·a)	表层10cm抗剪强度增量(kPa)	3年后植被存活率(%)
纯混凝土护坡	0	0.65	850	0	—
单一草本植草	75	0.38	320	+4.2	62
单一水土保持工程(截排)	0	0.42	180	0	—

#### 参考文献:

[1] 许栋良.山区公路边坡防护设计与施工关键技术探讨[J].时代汽车,2026,(08):153-155.  
 [2] 闫成云,陈立萍,刘如珍,等.地质灾害治理工程防治功能评估方法研究[J].甘肃地质,2026,35(01):88-93.  
 [3] 孙铁铎.生态绿化工程中的林业工程技术应用研究[J].农业灾害研究,2026,16(02):40-42.  
 [4] 罗欢.河道堤防工程水土保持与生态安全协同设计方法[J].水利技术监督,2026,(01):223-225+260.  
 [5] 王永胜,张超,王治国,等.全国水土保持规划实施情况协同复核系统设计与实践[J].中国水土保持,2023,(10):1-3+75.

水+挡墙)					
协同设计(乔灌草+三维网+截排水)	92	0.21	68	+11.5	88

(数据来源:黄土高原水土保持试验站监测报告及《水土保持通报》2025年相关实测数据整理)

##### 4.2 协同设计实施中的关键控制指标

协同设计需要量化控制三方面指标。一是坡面初始稳定周期。在植被根系尚未形成加固能力的6~12个月内,需要三维网、格构梁、锚杆等工程结构有足够的抗滑安全系数保障。监测坡段采用三维植被网联合截排水沟时,表层位移量比单独植被护坡的72%,给幼苗期植被营造良好的生长环境。二是乔灌草搭配与立地条件的关系。可按坡向、坡度和土壤厚度,确定植物配置密度:阳坡干旱区灌木占比不超过40%,阴坡湿润区适当增加乔灌草,实现快速覆盖。黄土高原试验表明,当灌木占35%~50%时,年土壤流失量可控制在100t/km<sup>2</sup>之内。三是截排水设施间距与植被带的关系。截水沟间距大于坡面汇流长度的临界值,其下沿应设置灌草缓冲带,起滞流拦沙作用,减少排水沟淤积速度。以上指标应在设计阶段进行数值模拟验证,并在施工期和养护期动态监测。

#### 5 结语

总而言之,林业工程与水土保持协同设计是“工程护坡、植被固土为主体”的防护体系,植物根系通过力学加固、水文调节的方式提高边坡稳定性,乔灌草立体配置、三维植被网护坡、截排水系统与植被缓冲带协同配置是实现协同设计的重要技术路径。典型工程案例证实了协同设计的效果:忽昌梁小流域项目年保土量8.62万吨,水土流失治理度92.66%;柳河北山小流域项目年保水45.6万立方米,林草覆盖率57%提高到70%。通过对不同护坡方式的比较,协同设计相对单一方式能够降低土壤侵蚀模数60%以上,植被存活率达到88%。植被恢复和水土保持工程结合才能保证边坡的长期稳定,草本植物根系虽然可以延长边坡稳定时间、降低破坏程度,但必须和其他工程结构协同才能保证长期安全。今后边坡防护工程要从设计源头实现林业工程与水保工程的深度融合,立足不同区域立地状况和灾害特点,“一地一策”实施协同设计。