

降雨工况下坡面水土保持措施防护效能分析

王仕伟

塔城水利设计研究院有限公司, 中国·新疆 塔城 834700

摘要: 坡面水土流失作为全球性的生态环境挑战, 其发生发展过程与降雨工况紧密耦合。在气候变化导致极端降水事件频发的背景下, 传统水土保持措施的防护效能面临严峻考验。本文系统综述了降雨特性对坡面侵蚀的驱动机制, 深入剖析了植物措施、工程措施及农业耕作措施在不同降雨工况下的响应规律与防护机理。

关键词: 降雨工况; 坡面侵蚀; 水土保持措施; 防护效能; 协同机制; 阈值效应

Analysis of the Protective Efficiency of Soil and Water Conservation Measures on Slopes under Rainfall Conditions

Wang Shiwei

Tacheng Water Conservancy Design & Research Institute Co., Ltd., China Xinjiang Tacheng 834700

Abstract: Slope soil erosion, as a global ecological and environmental challenge, is closely coupled with rainfall conditions. Against the backdrop of climate change leading to frequent extreme precipitation events, the protective effectiveness of traditional soil and water conservation measures faces severe challenges. This paper systematically reviews the driving mechanisms by which rainfall characteristics influence slope erosion, and thoroughly analyzes the response patterns and protective mechanisms of vegetative, engineering, and agricultural tillage measures under different rainfall conditions.

Keywords: Rainfall conditions; Slope erosion; Soil and water conservation measures; Protective efficiency; Synergistic mechanisms; Threshold effects

0 引言

土壤是陆地生态系统的基石, 而坡面作为水土流失最活跃的单元, 其稳定性直接关系到区域生态安全与可持续发展。降雨作为坡面侵蚀最主要的外营力, 其强度、历时、雨型及空间分布等特征直接决定了侵蚀动力的大小与形式。随着全球气候变暖, 水循环加剧, 短时强降雨、长历时暴雨等极端降雨事件的发生频率与强度显著增加, 这使得许多基于历史平均降雨参数设计的水土保持措施在实际运行中频频失效或效能衰减。例如, 在超标准暴雨下, 原本有效的梯田可能发生垮塌, 植被覆盖度较高的坡面也可能因土壤饱和而产生大规模浅层滑坡。这种“措施-降雨”匹配失衡的现象, 暴露出我们对降雨工况下措施防护效能认知存在的局限性。长期以来, 水土保持研究多侧重于措施本身的减水减沙效益测定, 而对降雨这一关键边界条件的动态变化及其与措施的互馈机制关注不足。现有评价体系往往将措施效能视为固定常数, 忽视了其不同降雨情景下的非线性响应特征。因此, 系统梳理降雨工况下坡面水土保持措施的防护效能演变规律, 揭示其作用机理与失效阈值, 不仅是学科发展的内在需求, 更是应对气候变化、

提升国土整治质量的迫切任务。

1 降雨驱动坡面侵蚀的动力学机制与措施响应基础

准确理解降雨如何触发并放大坡面侵蚀过程, 是评估任何防护措施效能的前提。这一过程并非简单的线性叠加, 而是涉及雨滴击溅、地表产流、细沟发育及重力失稳等多重物理过程的复杂耦合, 且每一环节都对特定类型的措施产生差异化响应。

1.1 雨滴动能与土壤表面密封的形成机制

降雨对坡面的初始破坏始于雨滴击溅。高速下落的雨滴携带巨大动能撞击裸露土表, 导致土壤团聚体崩解、颗粒分散, 并在表层形成致密的结皮层。该结皮层孔隙度急剧降低, 入渗能力可在数分钟内下降百分之五十以上, 从而大幅提前产流时间并增加径流量。研究表明, 雨滴直径与终点速度的乘积即动能是决定结皮发育速率的关键参数, 而降雨强度仅间接反映这一过程。这意味着, 即使总雨量相同, 短时高强降雨比长时低强毛毛雨更具侵蚀潜力。现有防护措施中, 冠层截留、枯落物覆盖及秸秆还田的核心功能之一, 正是通过吸收或偏转雨滴动能, 延缓甚至阻断

结皮形成,维持土壤入渗性能。若忽视这一微观机制,仅以覆盖率作为评价指标,极易高估稀疏植被或破碎覆盖物的实际防护效果。特别是在降雨初期,当植被尚未完全郁闭或枯落物层较薄时,雨滴击溅仍是主导侵蚀力,此时措施的防护效能高度依赖于其对动能的直接消减能力。

1.2 地表径流水力特性与细沟侵蚀的临界转换

当降雨超过入渗能力后,超渗径流沿坡面向下汇集,其剪切力随水深、流速及坡度增大而增强。一旦水流剪切力超过土壤抗剪强度,便触发细沟侵蚀,这是坡面泥沙的主要来源。细沟发育具有明显的阈值特征:存在一个临界单位面积径流功率,低于此值时侵蚀以片蚀为主,高于此值则迅速切入土体形成集中流道。值得注意的是,前期土壤含水量、容重及有机质含量显著影响该临界值。湿润土壤虽入渗率低但抗剪强度高,干燥土壤则相反。因此,同一场降雨在不同前期含水条件下可能引发截然不同的侵蚀响应。工程措施如梯田、鱼鳞坑的本质,是通过改变微地形降低局部坡度、分散径流能量,使水力参数始终维持在细沟发育阈值之下;而植物根系则通过提高土壤抗剪强度来提升临界值。二者作用路径不同,但在抑制细沟启动上殊途同归。然而,当降雨强度持续超过某一极限,径流功率远超阈值,即便是工程措施也可能因过流冲刷而失效,这揭示了措施效能的物理上限。

1.3 降雨时空变异性与措施效能的非平稳响应

自然降雨绝非均匀稳定过程,其强度、历时、间隔及空间分布均高度随机。这种变异性导致措施效能呈现显著非平稳特征:例如,等高草带在中小降雨下减沙率可达百分之八十以上,但在极端暴雨中因蓄水容量饱和而失效;石坎梯田在常规降雨下稳固,但在连续强降雨后因排水不畅发生垮塌。此外,降雨的空间异质性使得小尺度试验结果难以代表流域整体响应。当前大量研究基于单次模拟降雨或短期野外观测,所得效能参数往往缺乏对降雨谱系的代表性。真正可靠的效能评估,必须建立在对当地降雨频率分布、雨型结构及重现期特征的充分刻画之上,并将措施响应置于完整的降雨事件序列中进行检验,而非孤立地报告某次试验的减蚀百分比。这种非平稳性要求我们在设计防护措施时,必须考虑其对全谱系降雨的适应能力,而非仅针对某一设计标准。

2 主要水土保持措施的防护效能及其降雨依赖性解析

坡面防护措施种类繁多,其效能不仅取决于自身属性,更受制于降雨工况的动态调制。脱离具体降雨情境谈

最优措施无异于刻舟求剑,必须深入剖析各类措施在不同雨情下的表现规律。

2.1 植物措施的动态效能与季节-降雨耦合特征

植被被公认为最经济、最可持续的坡面防护手段,但其效能具有强烈动态性与季节性。冠层截留能力随叶面积指数变化,在落叶期或幼苗期几乎丧失;根系固土效应需数年才能充分发育,初期反而因扰动土壤加剧侵蚀;枯落物层虽能全年缓冲雨滴,但其分解速率受温湿度调控,在湿热地区更新快、厚度薄,防护持续性差。更重要的是,不同植物功能性状对应不同防护侧重:深根乔木利于深层锚固,浅根草本擅长表层覆盖,灌木则兼具两者优势。单一物种配置难以应对全生育期、全降雨谱系的侵蚀压力。近年研究强调功能群互补原则,通过乔灌草立体配置实现时间连续性与空间异质性的统一。然而,这种协同并非自动达成,若种间竞争过强或水文生态位重叠,反而降低整体效能。特别是在干旱半干旱区,雨季来临前的植被覆盖度往往最低,而此时恰是侵蚀高发期,形成了“防护空窗期”。因此,植物措施的设计必须基于对目标区域降雨节律与植物物候匹配的精细分析,选择能在关键侵蚀时段发挥最大效能的物种组合。

2.2 工程措施的阈值效应与维护需求

梯田、谷坊、挡土墙等工程措施以其即时、高效的减蚀能力著称,但其效能高度依赖设计标准与后期维护。在降雨未超设计重现期时,工程措施可近乎完全控制侵蚀;一旦超标,则可能发生灾难性失效,且修复成本高昂。例如,黄土高原水平梯田在百年一遇暴雨中损毁率可达百分之三十以上,而损毁后的裸露陡坎成为新的侵蚀热点。此外,工程措施改变了原有水文连通性,若排水系统堵塞或布局不合理,局部积水反而诱发滑坡。近年来,柔性工程理念兴起,如生态袋、植生毯、格宾网等,试图融合工程的结构性与植被的适应性。这类措施在中等降雨下表现优异,但在极端事件中仍显脆弱。关键在于,工程措施不应被视为一劳永逸的解决方案,而应纳入全生命周期管理框架,定期评估其结构完整性与功能衰减,并与生物措施形成冗余备份。特别是在气候变化背景下,原有设计标准可能不再适用,需重新校核工程的安全裕度。

2.3 耕作措施的短期高效性与长期局限性

等高耕作、垄作、免耕覆盖等农业水土保持措施,因其低成本、易推广而在农区广泛应用。其核心机制是通过改变地表微地形增加糙率、延长汇流时间,并通过残留物保护表土。大量试验表明,在年降雨量六百毫米以下地区,

合理耕作可减少土壤流失百分之四十至七十。然而,其效应对降雨极为敏感:当雨强超过一定阈值,垄沟被冲毁,减蚀效益迅速归零甚至转为负值,因集中水流加剧沟蚀。此外,长期免耕可能导致土壤压实、病虫害累积,反而降低生产力与抗蚀性。在气候变化背景下,传统耕作措施的适用窗口正在收窄。未来方向是将耕作措施嵌入更大的景观管理单元,如与植被缓冲带、田间蓄水设施联动,形成点线面结合的农田水土保持网络,以增强系统韧性。同时,需研发适应极端降雨的新型耕作技术,如强化垄体稳定性、优化残茬管理等,以拓展其在高强度降雨下的防护边界。

3 防护效能评估方法的演进、局限与整合路径

科学评估是优化措施配置的基础,但现有方法体系仍存在尺度割裂、过程简化及验证不足等问题,制约了对真实世界复杂响应的准确把握。唯有突破方法论瓶颈,方能实现从经验判断到精准预测的跨越。

3.1 野外径流小区观测的真实性与代表性困境

径流小区是获取一手数据的黄金标准,但其固有缺陷不容忽视:边界效应干扰自然汇流过程;安装过程扰动原状土;观测周期短难以捕捉稀有极端事件;点位稀少无法反映空间异质性。更关键的是,多数小区建于均质坡面,忽略了真实景观中的斑块镶嵌与水文连通性变异。近年来,大型自然坡面监测系统逐步弥补上述不足,但仍受限于成本与维护难度。未来应推动嵌套式观测设计,在小尺度精细过程研究与大尺度通量验证之间建立桥梁,并利用遥感反演产品扩展地面点的时空代表性。同时,应加强长期定位观测站网建设,积累涵盖多种降雨类型与措施组合的长序列数据集,为模型校准与效能验证提供坚实基础。只有基于长时间、多尺度的实测数据,才能真正揭示措施效能不同降雨工况下的演变规律。

3.2 人工模拟降雨试验的可控性与失真风险

模拟降雨允许精确控制雨强、历时及前期条件,极大提升了机理研究的效率。但其生成的雨滴谱、动能分布及空间均匀性与天然降雨存在系统性偏差,尤其在强降雨段常低估实际侵蚀力。此外,模拟试验多在短时间、小面积上进行,难以再现长时间尺度下的土壤反馈如结皮演化、根系生长。为减少失真,研究者尝试采用双喷嘴组合、风洞辅助等手段逼近自然雨谱,并结合野外校验系数进行修正。然而,根本出路在于将模拟试验定位为过程解析工具而非效能预测工具,其结果须经野外观测或模型验证后方可外推应用。同时,应发展更接近自然状态的模拟技术,如结合天然降雨与人工补雨,或在大型户外模拟平台上升

展试验,以提高结果的生态真实性。

3.3 数值模拟模型的参数不确定性与过程缺失

wepp、rusle、li-sem等模型实现了从点到流域的尺度跃升,但其精度高度依赖参数本地化与过程描述的完备性。许多模型仍将植被视为静态覆盖因子,忽略其水力调节与根系力学效应的动态耦合;对工程措施的表征过于简化,难以模拟其失效过程;对极端降雨下的非线性响应如滑坡侵蚀反馈刻画不足。参数不确定性更是普遍难题:土壤可蚀性、植被阻力系数等关键参数常借用文献值,导致预测误差可达数量级。未来模型发展需深度融合高分辨率遥感、无人机摄影测量及机器学习,实现参数的空间显式提取与动态更新;同时加强多过程耦合建模,将水文、侵蚀、植被生长及工程稳定性纳入统一框架,提升对复杂降雨工况的模拟保真度。唯有如此,模型才能从黑箱走向白箱,真正成为指导实践的科学工具。

4 结语

降雨工况下坡面水土保持措施的防护效能,本质上是一个动态、非线性且高度情境依赖的系统命题。它拒绝被简化为固定系数或通用公式,而要求我们在每一次评估中都重新倾听雨声、触摸土壤、理解生命与结构的对话。当我们不再把措施视为对抗自然的武器,而是作为顺应水沙规律、引导生态演替的媒介;当我们的评估不再止步于减沙数字,而是延伸至水源涵养、生物栖息与社区生计的多维福祉;当我们的设计不再追求绝对安全,而是培育在扰动中自我修复、在变化中持续学习的弹性系统,水土保持才真正拥有了面向未来的生命力。前路漫漫,唯有以谦卑之心面对自然的复杂性,以严谨之志深耕科学的细节,以包容之怀接纳多元的知识体系,方能在风雨飘摇的坡面上,筑起一道既坚固又温柔、既有效又可可持续的绿色屏障。这不仅是技术的精进,更是人与自然关系的一次深刻和解。让每一滴雨水都成为滋养而非剥夺的力量,让每一寸坡地都承载希望而非伤痕,这应当是我们所有研究与实践的终极归宿。在气候变化与人类活动双重压力下,唯有坚持系统思维、动态视角与人文关怀,水土保持事业方能行稳致远,为子孙后代留下生生不息的绿水青山。

参考文献:

- [1] 张磊. 辽西地区裸露坡面在不同降雨条件下的产流产沙特征分析[J]. 东北水利水电, 2025, 43(6): 41-42+67. DOI:10.14124/j.cnki.dbslkd22-1097.2025.06.009.
- [2] 张雅昕. 临时拦挡对工程堆积体坡面侵蚀及坡体稳定性影响[D]. 华中农业大学, 2025. DOI:10.27158/d.cnki.

ghznu.2025.001166.

[3] 刘鑫源. 基于浅水水沙动力学模型的滚波数值模拟研究[D]. 西北农林科技大学, 2025. DOI:10.27409/d.cnki.gxbnu.2025.001143.

[4] 麻力文. 饱和紫色土坡面细沟形态与水力学关系研

究[D]. 西南大学, 2023. DOI:10.27684/d.cnki.gxndx.2023.001461.

[5] 赵双庆. 董志塬黄土坡面侵蚀机制的试验研究[D]. 长安大学, 2020. DOI:10.26976/d.cnki.gchau.2020.001689.