

暴雨条件下水土保持措施对坡面产流产沙的影响机制研究

李可妮 高云峰

宜昌市夷陵区水利和湖泊局 湖北 宜昌 443000

【摘要】：暴雨是诱发坡面水土流失的核心动力因子，高强度降雨易突破坡面原有水土保持体系，引发剧烈的产流产沙过程，威胁区域生态安全与土地利用效率。不同水土保持措施通过改变坡面微地形、土壤理化性质及径流动力特征，实现对产流产沙的差异化调控，其中植被与工程措施耦合配置可使坡面径流系数与土壤侵蚀量大幅度降低。暴雨强度与措施布设方式对调控效果存在显著交互作用，高强度暴雨下措施的结构稳定性是维持水土保持功能的关键。本文探究水土保持措施在暴雨条件下对坡面产流产沙的调控效应，解析各措施对降雨截留、入渗补给、径流汇流及土壤侵蚀的影响机制。

【关键词】：暴雨条件；坡面产流产沙；水土保持措施；径流调控；土壤侵蚀

DOI:10.12417/2811-0722.26.03.063

引言

我国是暴雨频发且水土流失严重的国家，水土保持措施是防控坡面水土流失的核心手段，其通过改变坡面下垫面条件，干预产流产沙的关键过程，已在生产实践中得到广泛应用。但现有研究多聚焦于常规降雨条件下单一措施的效果分析，针对暴雨这种极端降雨事件，不同水土保持措施的调控机制、适用边界及耦合效应仍缺乏系统研究，导致暴雨频发区的水土保持措施布设存在盲目性，实际防控效果不佳。基于此，本文系统分析典型水土保持措施的作用机理，揭示暴雨强度、措施类型与布设方式的耦合作用规律，旨在弥补极端降雨条件下水土保持研究的不足，为我国水土流失综合治理体系的完善提供理论参考。

1 暴雨条件下典型水土保持措施的产流产沙调控效应

1.1 植被覆盖措施的调控效应

在暴雨过程中，植被冠层可直接截留部分降雨，减少雨滴对土壤表层的击溅能量，同时降低降雨到达地表的强度，延缓地表径流的形成时间；枯落物层覆盖于土壤表面，可进一步截留降雨，增加入渗时间，同时提升地表粗糙度，显著降低径流流速，减少径流对土壤的剪切力，此外，枯落物的分解可改善土壤理化性质，提升土壤入渗能力与抗蚀性；植被根系层则通过根系的穿插、缠绕作用，增强土壤颗粒间的粘结力，提升土壤的抗冲性，同时根系形成的孔隙通道可增加土壤入渗量，减少地表径流。

1.2 工程措施的调控效应

梯田通过将顺坡坡面改造为阶梯状平台，有效缩短坡长、

降低坡度，减少径流汇流面积，同时梯田的田埂可拦蓄部分地表径流，增加入渗时间，在暴雨条件下，梯田可使坡面径流流速降低，土壤侵蚀量减少；鱼鳞坑与水平沟则通过在坡面布设呈品字形或条状的蓄水坑槽，分散径流汇流，拦蓄暴雨产生的局部径流，同时坑槽内可蓄积土壤与水分，利于植被恢复，实现工程与生物措施的结合，其在陡坡坡面的暴雨防控效果尤为显著；谷坊则主要布设于坡面沟道内，通过拦蓄沟道径流与泥沙，防止沟道下切与溯源侵蚀，减少沟道产沙对下游坡面的影响。

1.3 耕作措施的调控效应

等高耕作通过沿等高线进行耕作，形成横向垄沟，可有效阻滞地表径流的顺坡流动，增加径流入渗时间，减少径流汇流，在暴雨强度较小的情况下，其可使坡面径流系数降低，土壤侵蚀量减少；沟垄耕作则通过形成垄沟相间的地表形态，垄体可截留降雨、拦蓄泥沙，沟道则可导流径流，减少径流对土壤的直接冲刷，同时垄沟内的土壤通气性与入渗能力得到提升；免耕覆盖则通过减少土壤翻耕，保留作物残茬，增加地表覆盖度，降低雨滴击溅作用，提升土壤入渗能力，其在农业坡面的暴雨防控中，可与植被覆盖措施形成协同效应。

1.4 复合措施的耦合调控效应

单一水土保持措施受自身功能限制，在暴雨条件下的调控效果存在瓶颈，而植被、工程、耕作措施的复合布设，可实现各措施的功能互补，形成“1+1>2”的耦合调控效应。例如，梯田与植被覆盖的复合措施，梯田通过改造微地形降低径流动力，植被覆盖则通过冠层截留、枯落物阻流进一步减少径流产生与土壤侵蚀，同时植被的根系可加固梯田土体，提升梯田的

作者简介：姓名：李可妮；出生年月：1994年9月；性别：女；民族：汉族；籍贯：湖北钟祥；学历：硕士研究生；研究方向：主要从事水土保持相关工作；

姓名：高云峰；籍贯：湖北宜昌；民族：汉族；性别：男；学历：本科学历；职业：水利电力中级职称；研究方向：主要从事水土保持相关工作。

结构稳定性；鱼鳞坑+灌木+草本的复合措施，鱼鳞坑拦蓄径流与泥沙，灌木与草本则通过多层级植被覆盖实现降雨截留与土壤固持，其在山地陡坡坡面的暴雨防控效果显著优于单一鱼鳞坑措施；农业坡面的等高耕作+免耕覆盖+作物秸秆还田复合措施，可在保障作物生长的前提下，实现对暴雨径流的多层级阻滞与土壤固持，提升农业坡面的水土保持能力。

2 暴雨条件下水土保持措施影响坡面产流产沙的内在机制

2.1 对降雨截留与土壤入渗的影响机制

水土保持措施对降雨截留与土壤入渗的提升作用，是减少暴雨条件下坡面径流产生的核心机制。植被覆盖措施通过冠层、枯落物层的双层截留，直接减少到达土壤表面的有效降雨量，其中冠层截留量与植被叶面积指数呈正相关，枯落物层截留量与枯落物厚度、持水能力呈正相关；同时，枯落物的分解与植被根系的活动可改善土壤孔隙结构，增加土壤毛管孔隙与非毛管孔隙，提升土壤饱和入渗率与入渗量，减少超渗径流的产生。工程措施则通过改造坡面微地形，增加坡面径流的滞留时间，为土壤入渗提供充足的时间，如梯田的平台与田埂、鱼鳞坑的坑槽均可形成局部蓄水区域，使暴雨产生的径流在局部区域缓慢入渗，减少地表径流的汇流总量。耕作措施则通过改变土壤表层结构，打破土壤板结层，增加土壤孔隙度，提升土壤入渗能力，如免耕覆盖可减少土壤结构的破坏，保持土壤孔隙的连通性，显著提升暴雨条件下的土壤入渗量。

2.2 对坡面径流动力特征的影响机制

水土保持措施通过改变坡面地表粗糙度、径流汇流路径、径流流速与水深，实现对坡面径流动力特征的调控，是减弱暴雨条件下径流侵蚀能力的关键机制。植被的枯落物层与根系层、耕作措施形成的垄沟、工程措施改造的微地形，均可显著增加坡面地表粗糙度，增大径流流动的阻力，降低径流流速；同时，工程措施如鱼鳞坑、水平沟可将顺坡的集中径流分散为局部的分散径流，改变径流汇流路径，减少径流动力的累积，使径流的剪切力与单位水流功率显著降低。径流动力特征的改变，直接导致径流对土壤颗粒的剥离与搬运能力下降，即使在暴雨条件下，也能有效减少坡面产沙量。

2.3 对土壤抗蚀性与抗冲性的提升机制

水土保持措施对土壤抗蚀性与抗冲性的提升，是减少暴雨条件下土壤颗粒剥离与搬运的核心内在机制。植被根系的穿插、缠绕与粘结作用，可将分散的土壤颗粒粘结为稳定的土体，形成根系固土网络，显著提升土壤的抗冲性，使土壤在径流剪切力作用下，不易被剥离与搬运；同时，植被枯落物的分解可增加土壤有机质含量，改善土壤结构，提升土壤颗粒间的粘结力，增强土壤的抗蚀性，降低雨滴击溅与径流冲刷对土壤表层结构的破坏程度。工程措施如梯田、谷坊则通过人工加固土体，

减少土体的坍塌与滑落，提升坡面土体的整体稳定性，在暴雨条件下，可有效防止坡面沟蚀与崩塌的发生，减少土壤侵蚀量。耕作措施如沟垄耕作、免耕覆盖则通过保留作物残茬、增加土壤有机质，改善土壤理化性质，提升土壤的抗蚀性与抗冲性，在农业坡面中，可有效减少暴雨诱发的农业面源水土流失。

2.4 暴雨强度与措施布设的交互作用机制

暴雨强度与水土保持措施布设方式的交互作用，是影响措施调控效果的重要机制，其核心体现为暴雨强度的变化会改变措施的功能阈值，而措施的布设方式则决定了其在不同暴雨强度下的适应性。在低强度暴雨条件下，多数单一水土保持措施均可实现较好的调控效果，措施的布设密度与方式对调控效果的影响较小；而在中高强度暴雨条件下，措施的结构稳定性与布设密度成为决定调控效果的关键，当暴雨强度超过措施的功能阈值时，部分单一措施会因结构破坏而丧失水土保持功能，如裸地坡面的简易耕作措施在高强度暴雨下易被径流冲刷破坏，失去调控作用。措施的布设方式对调控效果的影响主要体现在布设密度、布设方向与坡面地形的匹配性，如等高布设的工程措施与耕作措施，其在顺坡坡面的暴雨防控效果显著优于随机布设，而在陡坡坡面，增加措施的布设密度可显著提升调控效果。

3 暴雨频发区坡面水土保持措施的优化配置策略

3.1 基于坡面地形特征的差异化配置

坡面地形是决定水土保持措施配置的基础依据，需根据地形特征进行差异化布设，提升措施与坡面的匹配性。对于坡度小于 15° 的缓坡坡面，以植被覆盖措施与耕作措施为主，可采用植被混交模式，配合等高耕作、免耕覆盖等耕作措施，在保障生态效益的同时，兼顾农业生产；对于坡度在 $15^\circ \sim 25^\circ$ 的陡坡坡面，以工程措施与植被覆盖措施的复合配置为主，优先布设鱼鳞坑、水平沟等工程措施，坑槽内配置灌木与草本植被，实现工程固土与生物保水的协同效应；对于坡度大于 25° 的急陡坡坡面，严禁农业生产，采用工程措施为主、植被措施为辅的配置模式，布设梯田、谷坊等工程措施加固土体，同时结合喷播绿化等方式恢复植被，提升坡面整体稳定性；对于长坡坡面，采用分段布设、梯级调控的方式，在坡面上部布设鱼鳞坑、水平沟等分散径流的措施，在坡面下部布设梯田、谷坊等拦蓄径流与泥沙的措施，减少径流动力的顺坡累积。

3.2 基于暴雨特征的针对性配置

根据区域暴雨特征进行水土保持措施的针对性配置，提升措施对极端降雨事件的适应性。对于短历时高强度暴雨频发区，重点提升措施的径流拦蓄能力与结构稳定性，优先布设梯田、谷坊等工程措施，配合高覆盖度的植被混交模式，减少径流的快速汇流与土壤侵蚀；对于长历时中强度暴雨频发区，重点提升措施的土壤入渗能力与降雨截留能力，采用植被覆盖与

耕作措施融合的复合配置,增加枯落物层厚度,推行免耕覆盖、秸秆还田等耕作方式,提升土壤入渗量,减少地表径流的累积;对于混合型暴雨频发区,采用综合复合配置模式,实现对不同强度、不同历时暴雨的全方位调控,同时注重措施的布设密度,提升整体水土保持效能。

3.3 基于土地利用类型的协同性配置

结合坡面土地利用类型,进行水土保持措施的协同性配置,实现生态保护与生产发展的协同推进。对于生态坡面,以生态效益为核心,采用自然恢复与人工辅助融合的模式,优先布设植被覆盖措施与生态型工程措施,减少人为干扰,提升坡面生态系统的自我修复能力与水土保持功能;对于农业坡面,采用耕作措施与轻度工程措施、植被措施的复合配置,在保障农业生产与经济效益的前提下,实现对暴雨条件下坡面产流产沙的有效调控;对于工矿坡面,以快速恢复坡面稳定性为核心,采用工程措施与植被措施的快速复合配置,先布设挡土墙、格构等工程措施加固土体,再通过喷播、植生袋等方式恢复植被,提升坡面水土保持能力。

3.4 强化复合措施的系统布设与动态优化

复合措施的系统布设是提升暴雨频发区坡面水土保持效能的关键,需打破单一措施的布设模式,构建复合水土保持体

系。在坡面尺度,构建梯级复合体系,坡面中上部布设植被覆盖措施与鱼鳞坑、水平沟等分散径流的工程措施,坡面中部布设等高耕作、沟垄耕作等耕作措施,坡面下部布设梯田、谷坊等拦蓄径流与泥沙的工程措施;在区域尺度,结合流域水文特征,将坡面水土保持措施与流域沟道治理措施进行系统衔接,形成坡面-沟道一体化的水土保持体系,提升区域整体的暴雨防控能力。同时,根据坡面生态系统的演变与暴雨特征的变化,对水土保持措施进行动态优化,及时修复受损措施,调整布设方式与密度,提升措施的长期稳定性与调控效果。

4 结语

暴雨条件下的坡面产流产沙是降雨、地形、土壤、下垫面等多因素共同作用的复杂物理过程,水土保持措施作为人为调控水土流失的核心手段,通过改变坡面下垫面特征,从降雨截留、土壤入渗、径流动力调控、土壤固持等关键环节切入,形成协同调控体系,实现对坡面产流产沙的有效管控。在全球气候变化背景下,极端暴雨事件的发生频率与强度呈上升趋势,坡面水土流失的防控压力持续增大,深入研究水土保持措施的暴雨调控机制,构建科学、高效、适配的坡面水土保持体系,对防控暴雨诱发的水土流失、保护区域生态安全、提升土地生产力、推动生态保护与高质量发展协同推进具有重要的现实意义与长远的战略价值。

参考文献:

- [1] 赵妍,周珊珊,高云飞,等.特大暴雨下残垣丘陵沟壑区水土流失与梯田措施效益评价[J].水土保持通报,2024,44(05):92-99.
- [2] 赵泽坤,史明昌,杨润泽,等.暴雨条件下水土保持措施对坡面产流产沙的影响[J].水土保持研究,2025,32(02):43-51.
- [3] 任正龔,张栋,杨志,等.不同降水强度等级和坡度下水土保持措施减流减沙效益研究[J].中国水土保持,2022,(06):40-43+9.
- [4] 肖培青,王玲玲,杨吉山,等.大暴雨作用下黄土高原典型流域水土保持措施减沙效益研究[J].水利学报,2020,51(09):1149-1156.
- [5] 隋旭红,夏振飞,李枫,等.暴雨条件下水土保持措施效益分析[J].安徽农业科学,2017,45(12):180-183+186.