

宗家明, 陈剑刚, 王辰元, 等. 泥石流沟道植被生长特征与减灾模式研究[J]. 灾害学, 2025, 40(3): 167-173. [ZONG Jiaming, CHEN Ji-ang, WANG Chenyuan, et al., Research on the Growth Characteristics of Vegetation in Debris Flow Gullies and Disaster Mitigation Patterns [J]. Journal of Catastrophology, 2025, 40 (3): 167-173. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2025.03.025.]

泥石流沟道植被生长特征与减灾模式研究*

宗家明^{1,2,3}, 陈剑刚^{1,2}, 王辰元^{1,2,3}, 王金水^{1,2,3}, 王喜安^{1,2,3}, 杨飞^{1,2,3}

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610213; 2. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610299; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 泥石流沟道植被状况因地理环境和植物生长特性的差异而有所不同, 影响了泥石流的成灾环境和工程防治效果, 制约了绿色减灾技术的发展。为研究不同流域泥石流沟道植被生长状况及其减灾作用, 通过野外调查对研究区植被生长分布特征进行采集分析。结果表明: 不同植被物种间距分布相对固定; 树种自身因素比环境因素对林分密度影响更明显, 不同流域的林分密度范围为100~5 000株/hm²; 植被生长状况与土体破碎程度之间呈负相关, 沟道侵蚀严重区域的树木平均胸径比稳固区的更小; 此外, 植被根系横截面积比: $RAR_{(乔)} \geq RAR_{(灌)} \geq RAR_{(草)}$ 。基于此, 提出了一种沟道减灾模式评估方法, 并对不同减灾模式适用性进行了总结。研究结果可为山区泥石流的绿色减灾提供一定参考。

关键词: 泥石流; 流域环境; 植被分布; 生长特征; 减灾模式

中图分类号: X43; X915.5; X45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2025)03-0167-07

泥石流作为全球性地质灾害, 一直是世界各国山地灾害防治的重点目标^[1]。尤其在我国的复杂地质地形和集中降雨影响, 具有规模大、频率高、破坏力强的特点, 严重威胁山区人民生命财产安全。长期以来, 国内外的泥石流防治主要是以岩土工程措施为主, 实行“稳、拦、排、停”进行治理。其

受气候影响小、适用性强且短时间内减灾效果显著, 但从长期来看, 岩土工程的减灾功能会随着时间的增长而衰减^[2], 且防治工程库容有限, 后期清淤维护成本高(图1)。此外, 岩土工程的环境兼容性和耐候性较差, 对环境的负面影响大, 使得治理成效缺乏系统性和可持续性^[3]。



(a) 簇头沟泥石流拦砂坝淤满



(b) 彻底关沟拦砂坝溢流口损毁

图1 岩土工程淤满或溢流口破坏案例

随着生态保护意识的增强, 森林植被在泥石流治理中的积极效益, 特别是在长期减灾中, 搭配生态防治措施的绿色综合减灾模式已成为泥石流治理的重点研究方向。生态减灾措施主要通过优化植被空间分布, 利用植被拦淤固土、提高土体黏聚力^[4], 减少地表产流入渗^[5]等特点, 达到泥石流治理。如, 沟道中的树木可作为截流消能的障碍结构, 增加沟

道糙率, 促进泥石流的沉积; 植被可以利用冠层效应, 对雨水进行层层截留, 削弱降雨的渗透侵蚀能力, 延缓洪峰径流时间; 枯枝落叶层可对土壤起到保护作用, 提高土壤抗侵蚀性^[6]。此外, 植被根系形成的网状锚固结构可以有效增加浅层土体的稳定性, 提高土壤的抗剪切强度, 削减泥石流的物源补给量^[5, 7]。

* 收稿日期: 2024-09-12 修回日期: 2024-12-19

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目“山地灾害形成机理与减灾”(41925030)

第一作者简介: 宗家明(1999—), 男, 汉族, 江西赣州人, 硕士研究生, 主要从事泥石流灾害防治研究. E-mail: zongjiaming@imde.ac.cn

通信作者: 陈剑刚(1982—), 男, 汉族, 河北邢台人, 研究员, 主要从事泥石流灾害防治工程研究. E-mail: chenjg@imde.ac.cn

目前大量研究论证了森林植被对于泥石流的拦截、停淤作用^[8-10]。毕慈芬等^[11]通过室内水槽模拟试验,论证了沙棘在砒砂岩地区沟道治理中的拦沙截流作用;刘峰等^[12]利用有限元对植物“柔性坝”过流时的水动力学特性,建立了清水条件下的植物二维水动力学方程;杨方社等^[13]基于VFSSMOD模型对沙棘-灌草植被过滤带的泥沙拦截效果进行了模拟研究;陈文乐^[14]通过水槽模拟试验研究了植被过滤带的布置模式对泥石流运动、停淤的影响,建立了相关的拦砂截流方程。但是,这些研究主要基于简化模型试验或软件模拟,缺乏野外实际数据支持,对植被在不同流域环境下的生长差异情况,在泥石流降雨截流、固土护坡的减灾作用,以及不同植被在泥石流防治中的影响和减灾模式的研究不足。基于此,为区别不同流域环境下的泥石流防治减灾模式,明晰森林植被的生长状况和减灾作用,本文选择四川、甘肃两省泥石流高发流域的典型沟道,开展对

沟道地质特征和森林植被生长状况调查,总结不同流域环境下的植被类型和分布特征,并结合不同指标评估泥石流的危害性和沟道治理的必要性,提出合适的防治措施,为生态减灾模式的合理应用和生态-岩土综合减灾模式的搭配组合提供参考。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 研究区域概况

本研究调查了安宁河流域、岷江上游流域、沱江上游流域以及白龙江流域的部分典型泥石流沟道。这些研究区位于青藏高原东缘与四川盆地过渡带,自南向北依次跨越横断山脉、松潘高原和岷山山脉。受青藏高原隆升及河流强烈深切作用影响,区内断裂发育,属于高山峡谷地形^[15],总体呈西北高东南低,险峻地形^[16](图2)。

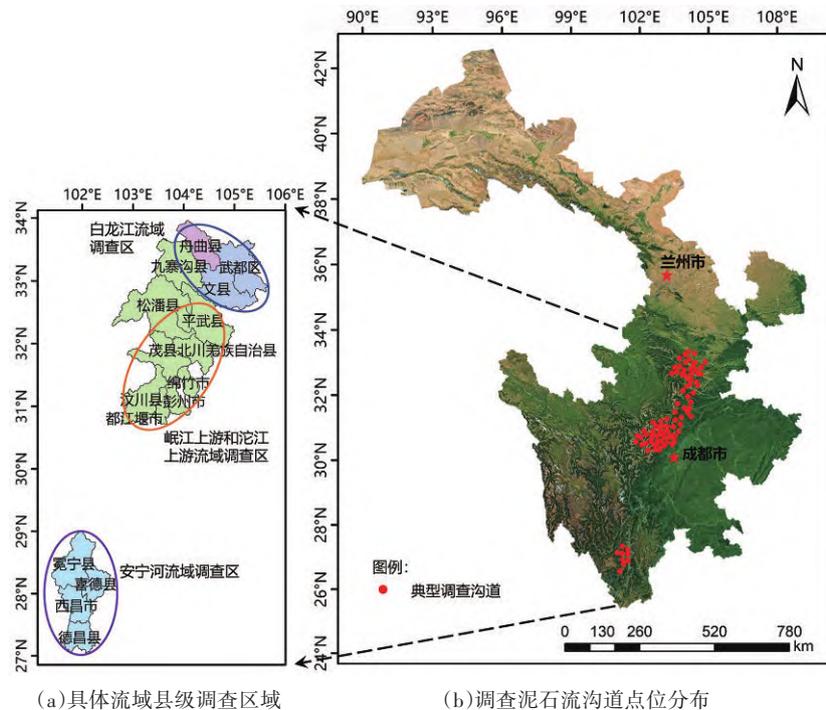


图2 调查区域概况

注:基于审图号为GS(2019)1822号标准地图制作,底图无修改,下同

泥石流灾害演化是一个复杂的动力学过程^[17],且研究区地质构造复杂,导致各流域泥石流性质也呈现不同的差异性。安宁河流域地处横断山脉东缘,以中、深切割剥蚀、侵蚀的中山地貌为主^[18];岷江上游和沱江上游流域位于松潘-甘孜褶皱带以及龙门山构造带的结合部位^[19],区域地质构造活动强烈;白龙江流域位于青藏高原、黄土高原、四川盆地三大复杂地貌单元交界处,属于侵蚀-剥蚀构造山地。强烈的地质构造活动和山高谷深的地形地貌为泥石流的成灾发育提供了有利的地质条件。此外,研究区内气候垂直性差异大,高山峡谷焚风显著,降水集中^[20],亦是泥石流灾害频发的诱因。

据历史资料和野外调查,研究区内的安宁河流域泥石流沟道有530条^[21],岷江上游流域533条^[22],沱江上游流域109条^[23],白龙江流域388条^[16, 24],本

文中选取了61条典型泥石流沟道作为重点考察,分析其地质特征和植被生长状况,探索不同流域沟道的泥石流减灾模式。

1.2 研究方法

为准确采集野外沟道地形和植被生长状况,采用大疆无人机(UAV,垂直水平精度 ± 0.3 m)拍摄沟道地形影像;索尼摄像机(RX10M4)记录承灾体、沟道形态特征和植被生长状况;Contour XLRic高精度激光测距仪(最大测距1850 m、测量精度0.1 m)、电子数显游标卡尺和卷尺等工具测量森林植被生长状况数据。调查样方根据流域沟道植被类型(乔木、灌木、草本)选择,参数包括植被种类、胸径、分布间距和根系特征等。

后期通过影像解译获取泥石流沟道高精度高程数据(DEM),结合文献对比分析不同时期的沟道淤积形态特征和植被生长状况,评估森林植被的减灾

作用。林分密度是研究森林减灾的重要指标,反映林地内树木的拥挤程度,由单位面积株数、林木平均胸径以及分布形式决定,林分密度越大,拦挡和停淤效果越好。研究中主要采用单位面积株数密度(N)和林分密度(SDI)指数进行林分密度计算^[25]。

REINEKE^[25-26]基于完满立木度提出了 SDI 林分密度指标:

$$SDI=N\left(\frac{D_g}{D_0}\right)\beta \quad (1)$$

式中: N 是株数密度(株/ hm^2); D_g 为现实林分平均胸径(m); D_0 为林分标准直径,一般取值0.2 m; β 为林分自然稀疏系数。

对于植被根系的固土减灾效益研究,WU^[27]-WALDRON^[28]模型指出植被根系对于土体抗剪强度的增量主要取决于根的平均抗拉强度(T_r)和根系横截面积比(RAR)^[29]:

$$RAR=\frac{\sum_{i=1}^n \frac{\pi d_i^2}{4}}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (2)$$

式中: d_i 为第 i 根根系的直径(mm); n 为根系总数(根); D 为根系在水平方向上最大延伸长度(mm)。调查土层深度为10 cm,假设该深度范围内植被根系直径相等,即取根系平均直径为计算直径^[30]。

2 不同流域沟道特征与植被生长状况

通过对研究区内的泥石流沟道地质条件、植被分布类型、林分密度、根系特征等方面进行了调查分析,总结了不同流域环境下的沟道特征和植被生长状况。

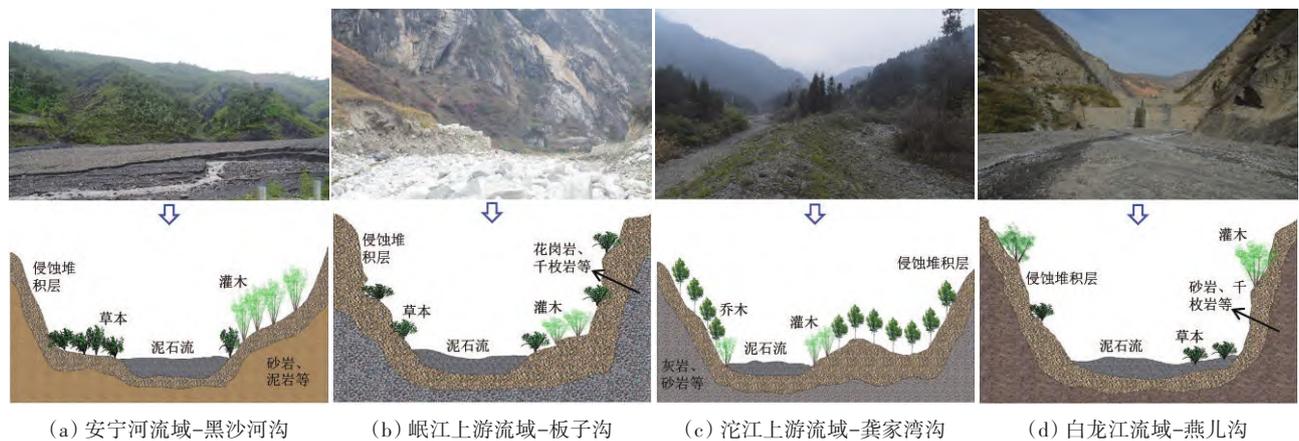


图3 不同流域沟道与植被分布模式

2.2 植被生长状况特征

在宏观评价植被减灾效益时,主要考虑的是植被的间距、胸径和根系等对于泥石流的拦淤截流和固土护坡作用。

受季风气候和地质条件的影响,山地形成特殊的垂直性水热分布与土壤成分,植被种类也具有明显的垂直分布特点,随海拔升高,经历乔木-灌木-草本的变化。其中乔木间距主要为1.5~3.5 m,灌木间距为0.5~2 m。调查植被数据点位分布发现(图4),在不同流域沟道周围,树种自身特性对于森林林分密度的影响大于沟道地质和降雨等环境因素,

2.1 泥石流沟道特征

本研究调查了四个流域内泥石流沟道的地质地形和植被分布模式,并绘制了典型沟道与植被分布关系模式(图3)。其中,安宁河流域沟谷呈“U”型,物源以松散土体、细沙和细颗粒碎屑岩,粒径小于20 cm,流体性质以稀性为主;沟道土体松软,侵蚀严重,地质条件不宜大型乔、灌木生长,多分布小型灌木和草本植物,保土固沙能力较差。岷江上游流域沟谷呈“V”型,受地震和断裂发育影响,基岩风化、侵蚀严重,沟道物源以碎裂基岩、大颗粒块石、卵石为主,堆积物的孔隙率较大、结构松散,粒径在10~80 cm,流体性质以稀性为主,破坏性较大;山体坡面浅表层多为陡立基岩、花岗岩,气候干旱,高温少雨,生态环境脆弱,植被覆盖度差,除都江堰地区植被相对茂盛,其他区域植被稀少。而沱江上游流域沟谷以“U”型和复合型为主,沟道、坡面堆积物多为含碎石粉质黏土和块石,岩性以砂岩、灰岩为主,碎石含量30%左右,粒径5~80 cm,个别可达2 m,多呈棱角状,孔隙间充填角砾、泥质,结构松散,流体性质以稀性为主;沟道堆积物粒径差异性较大,冲击能力较强,沟道内植被多为快速生长的灌木和草本,而坡岸土体完整性较好,植被茂盛,以乔木为主,树种多为柳杉、杉木,覆盖率高。白龙江流域沟谷呈“V”型,两岸坡度较陡,沟道狭长,浅表层为风化严重砂岩、千枚岩,地表多见黄土和厚层松散堆积物,土体强度低,物源以泥沙和碎石为主,粒径较小,流体性质偏粘性;流域内光照充足,气候炎热少雨,地表裸露,水土流失严重,生态脆弱,沟道内植被稀少,坡岸和堆积区分布少量草本、灌木。

主要体现在树木间距差异不大时,树种对胸径生长的控制作用。其中安宁河流域的树木林分密度范围为200~1 000株/ hm^2 ,岷江上游流域为150~3 000株/ hm^2 ,沱江上游流域为500~5 000株/ hm^2 ,白龙江流域为100~2 000株/ hm^2 。

在同一泥石流沟道内,植被物种类型基本不变,但由于沟道不同区域受泥石流、降雨等冲刷侵蚀程度的不同,土体结构的完整性和破碎程度存在差异,导致树木生长状况有显著差异。本文将沟道土体破碎程度划分为三类:①完整,土体结构未发生明显破碎,颗粒间连接紧密,整体性强,多位于沟道两

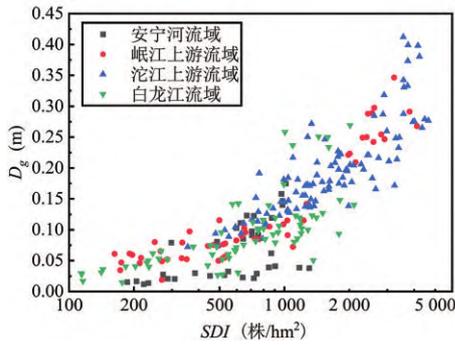


图4 林分密度与树木平均胸径分布关系

岸稳固坡体；②较为破碎，土体结构出现部分破碎，颗粒间的连接减弱，但结构相对稳定，主要位于泥石流物源堆积区及滑坡、裂隙分布区；③严重破碎，土体结构破碎严重，颗粒间连接基本丧失，整体稳定性极差，主要位于沟道流通区和下游停淤堆积区。

本次研究分别调查了沟道土体破碎区和完整区域的树木生长状况(图5)。土体结构破碎区域的树木胸径一般小于土体完整区。对于一定生长年限的林带，破碎区和完整区的树木平均胸径差异一般在10~30 mm，最大可达100 mm。表明土体破碎程度和植被生长状况间呈负相关，即沟道侵蚀越剧烈，土体稳定性越差，树木生长也越差；而植被茂盛区的土体破碎程度更低，体现了森林植被能降低土体侵蚀速率，提高土体稳定性，有效减少泥石流固体物质的补给。

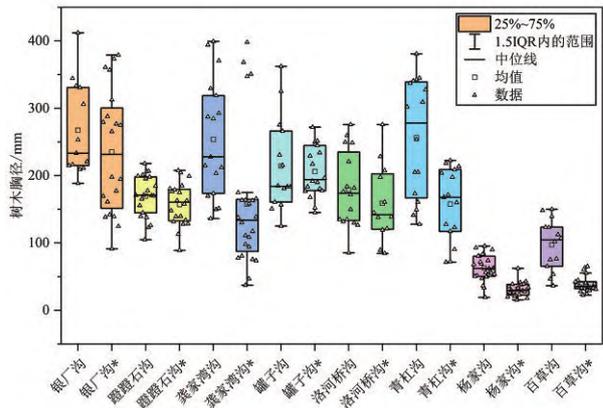


图5 沟道不同区域树木胸径差异对比(*表示土体破碎区域)

通过对比分析不同植被的根系结构及根系横截面积比，发现不同植被的根系分布具有减灾效果(图6)。对生长良好的植被测量，柳杉、马桑和芦苇的根系横截面积比分别为 $6 \times 10^{-3} \sim 1.2 \times 10^{-2}$ 、 $3 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-3}$ 和 $1 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3}$ ，即 $RAR_{(乔)} \geq RAR_{(灌)} \geq RAR_{(草)}$ 。说明乔木林带对于土体的固结和沟道形态的稳固效果最好，有效提升了周围土体的抗剪切强度，减少了沟道物源补给，其次是灌木，最后是草本植物。虽然灌木和草本根系强度不高，但其纤维根系丛生密布，相互联结耦合，土体覆盖性好^[31-33]，对于减少浅表层土壤径流、侵蚀方面有较好的效果^[34-35]。



(a)乔木根系 (b)灌木根系 (c)草本根系

图6 不同植被根系分布

3 减灾模式评估与适用性分析

泥石流的冲刷和植被生长对沟道形态的影响，导致不同发展时期的流域沟道断面形式和成灾减灾模式也不一样。研究发现(图7)，泥石流河谷上游的纵向坡度较大，土体在重力和降雨作用下不断侵蚀下切，形成“V”型沟谷；随着物源不断积累和强降雨诱发的泥石流流动，下切的同时发生侧向侵蚀，使沟道不断变宽然后淤积，演变成“U”型；在长期的冲刷侵蚀作用下，沟道下游泥石流漫滩堆积，加上植被的拦淤、固土作用，形成淤积平原，并进一步演化成多沟道流通的复合型泥石流沟谷^[36]。

从治理泥石流灾害角度看，现有的防治措施简单地按照形成区、流通区、堆积区来划分过于宽泛。从防治目标和经济效益角度看，并非所有的沟道都适用工程防治。为规范合理地应用泥石流防治措施，

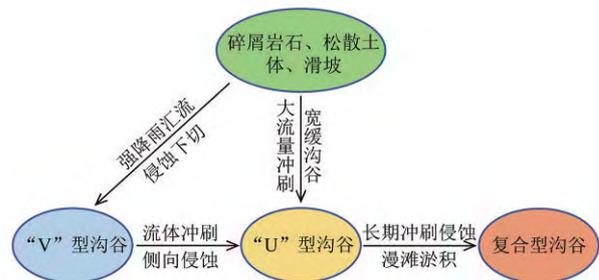


图7 泥石流沟谷演化示意图

本研究基于对不同流域泥石流沟道特征和植被生长状况的分析，提出沟道减灾模式评估方法，并根据对不同指标的评估，选择合适的减灾模式。

3.1 沟道减灾模式评估

结合不同泥石流沟道的特点和防治要求，选择合适的减灾模式，提出了四类沟道减灾模式的评估

指标: 即承灾体、泥石流危害性、沟道特征和植被特征。综合评估这四类指标, 分析沟道治理的必要

性及所适用的防治模式。具体指标量化见图 8。

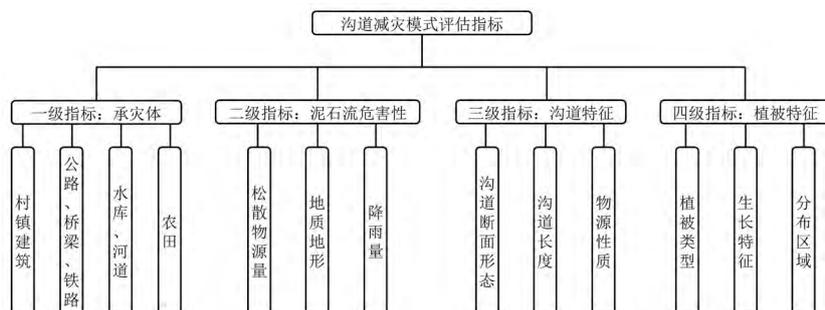


图8 泥石流沟道减灾模式评估

首先描述承灾体的类型、结构尺寸和空间位置, 再调查沟道内地质地形、松散物源量及历年降雨量, 分析该沟道泥石流暴发的可能性和规模。对于周围有村镇、公路、桥梁等重要承灾体且有泥石流风险区域, 应采用以岩土工程为主、植被措施为辅的生态-岩土综合减灾模式; 对于承灾体是河道、农田等相对重要区域, 应结合经济效益和次生灾害风险评估其防治等级, 如甘肃武都区佛堂沟下游的油橄榄种植基地和四川清平文家沟泥石流堵江事件, 适用生态-岩土综合减灾模式; 而对于没有承灾体或物源不足, 泥石流暴发危害性不大的沟道, 可因地制宜采用生态减灾模式, 既节约成本又改善生态环境。

3.2 减灾模式适用性分析

3.2.1 生态减灾模式

对于非必需岩土措施的泥石流沟, 可根据沟道地质地形和当地植被生长分布特征, 布置生态减灾模式。对于生态环境脆弱的区域, 如白龙江流域, 宜优先采用人工措施加固, 如格构式护坡、坡面压条、木桩加固等技术稳固土体; 随后种草护坡, 通过钉柱挂网铺草, 短期内形成生态防护膜, 减少水土流失; 随着沟道逐渐稳固, 可进一步种植适宜的灌木、乔木等植被, 改善沟道生态环境。对于立地条件较好的流域, 如沱江上游流域, 可直接采用种树措施, 种植水源涵养林、固堤护坡林等, 植树前应对地面进行整修, 坡度较陡的沟道, 可采用阶梯式植树护沟, 以增加土体稳定和树种成活率。

3.2.2 生态-岩土综合减灾模式

对于需要采用生态-岩土综合减灾模式的沟道, 根据沟道的范围、断面形态及泥石流性质等特征, 选择合适的拦挡、排淤等工程措施; 并结合植被类型、生长状况, 布置适宜当地的森林植被措施。①根据沟道的地质地形和防治目标, 在沟谷中设置合适的拦挡坝, 阻挡固体物质, 降低泥石流的流速流量。②设置阶梯-深潭系统^[37]、固床工程等措施稳固沟床。经坡岸和底部稳定淤积后, 根据植被特点, 在沟道及侵蚀强烈的边坡布置草皮或植物谷坊, 进行扦插种林, 减缓沟道侵蚀、拓宽。如文家沟泥石流沟道内的阶梯式钢筋笼固床工程及两侧坡岸的坡改梯扦插种树工程。③在泥石流下游沟道、滩地, 可利用地形开挖沟槽, 铺设排导槽和停淤场, 稳定沟床并使泥石流停淤堆积至宽敞滩地。同时, 在泥石流停淤滩地上配合排水等工程措施, 采用生态修

复措施, 在沟道侧面布置护堤防冲林、薪炭林, 或堆积滩地上加种经济林, 建立生态护滩, 形成生态-岩土措施相结合的综合减灾模式。

4 结论与讨论

本研究通过对四川、甘肃两省不同流域环境下的典型泥石流沟道特征和植被生长状况调查, 分析发现:

1) 不同种类的乔、灌木间距分布差异较小, 乔木间距为 1.5~3.5 m, 灌木间距为 0.5~2 m;
2) 对于林分密度, 树种自身因素比外部环境因素的影响更为明显, 不同树种林分密度范围差异较大;

3) 地质土体结构是影响树木生长状况的关键因素, 沟道土体的侵蚀、破碎程度和植被生长状况呈明显负相关, 土体破碎区域的树木平均胸径小于稳固区;

4) 森林植被系统中, 植被根系横截面积比为 $RAR_{(乔)} \geq RAR_{(灌)} \geq RAR_{(草)}$ 。结果表明, 泥石流沟道植被减灾效果为乔木林地 > 灌木丛 > 草本植物。

在调查的基础上, 提出了一种考虑承灾体、泥石流危害性、沟道特征和植被特征的泥石流沟道减灾模式评估方法, 并对不同流域沟道特征的泥石流减灾模式适用性进行了分析总结。

泥石流沟道地形(坡-沟-谷-滩)的演化与成灾转化是一个复杂的过程。岩土体风化破碎、坡沟侵蚀及漂木堵塞溃决等过程会放大泥石流灾害规模和危险性。不同于传统岩土工程措施的被动型防灾模式, 本文构建的减灾模式则更强调生态措施在灾前主动改善成灾环境及减小灾害规模, 注重岩土与生态措施的协同减灾。通过森林植被的多样性分布和根系固土护坡作用调控泥石流的形成、运动和堆积, 结合岩土工程的硬性防控技术, 实现泥石流治理。

以上对不同流域植被生长特征和泥石流减灾模式适用性的调查分析, 可为泥石流岩土与生态措施协同减灾模式研究提供数据支撑。目前对不同沟道植被的减灾作用尚未量化, 不同时间、空间条件下的植被生长特征和减灾作用也不明确, 对于生态减灾模式还处于探索阶段, 这也是今后岩土与生态措施协同减灾的重点发展方向。

参考文献:

- [1] CUI P, LIN Y M. Debris-flow treatment: the integration of botanical and geotechnical methods [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2013, 4(2): 97-104.
- [2] 祁生文, 刘方翠, 徐梦珍, 等. 小流域生态-岩土协同减灾原理与方法初探[J]. *水力发电学报*, 2024, 43(2): 1-14.
- [3] 常士秋, 王道杰, 张淑娟, 等. 泥石流小流域生态功能分区及生态修复对策研究[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 41(10): 61-67.
- [4] 程洪, 颜传盛, 李建庆, 等. 草本植物根系网的固土机制模式与力学试验研究[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(1): 62-65.
- [5] 熊燕梅, 夏汉平, 李志安, 等. 植物根系固坡抗蚀的效应与机理研究进展[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(4): 895-904.
- [6] 崔鹏, 王道杰, 韦方强. 干热河谷生态修复模式及其效应: 以中国科学院东川泥石流观测研究站为例[J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3(3): 60-64.
- [7] 高相波, 李丽慧. 热水河流域典型泥石流灾害成因机制与协同防治研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(5): 1039-1048.
- [8] ISHIKAWA Y, KAWAKAMI S, MORIMOTO C, et al. Suppression of debris movement by forests and damage to forests by debris deposition [J]. *Journal of Forest Research*, 2003, 8(1): 37-47.
- [9] 李自刚, 姜宗辉. 林带拦截泥石流效果浅析[J]. *水土保持科技情报*, 2004(1): 39-40.
- [10] MALIK I, TIE Y B, OWCZAREK P, et al. Human-planted alder trees as a protection against debris flows (a dendrochronological study from the Moxi Basin, Southwestern China) [J]. *Geochronometria*, 2013, 40(3): 208-216.
- [11] 毕慈芬, 乔旺林. 沙棘柔性坝在砭砂岩地区沟道治理中的试验[J]. *沙棘*, 2000(1): 28-34.
- [12] 刘锋, 邱秀云, 龚守华, 等. 植物“柔性坝”过流水动力学方程的建立及其数值模拟[J]. *新疆农业大学学报*, 2010, 33(4): 354-358.
- [13] 杨方社, 曹明明, 李怀恩, 等. 基于VFSMOD模型的沙棘-灌草植被过滤带拦沙效果模拟[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(6): 71-75.
- [14] 陈文乐. 典型生物工程与岩土工程泥砂拦截优化配置试验研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所), 2020.
- [15] 张瑞端. 安宁河断裂带发育特征与地质灾害效应研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- [16] 陈世昌. 舟曲县地质灾害特征及发育规律[J]. *西部资源*, 2021(4): 132-134.
- [17] 刘波, 胡卸文, 何坤. 汶川强震区震裂山体分布特征与成灾模式研究[J]. *灾害学*, 2024, 39(1): 177-187.
- [18] 常晓军, 丁俊, 魏伦武, 等. 四川安宁河流域地质灾害发育分布规律浅析[J]. *四川地质学报*, 2008, 28(1): 35-40.
- [19] 田述军, 温宇航, 伍文洽, 等. 岷江上游坡断型裂点迁移速率与构造隆升历史研究[J]. *地学前缘*, 2024, 31(4): 314-325.
- [20] 黄兰鹰, 杨育林, 高鹏, 等. 应用Landsat影像数据分析岷江上游植被覆盖度时空变化及地形分异特征[J]. *东北林业大学学报*, 2023, 51(1): 54-60.
- [21] 李秀珍, 刘希林, 苏鹏程. 四川凉山州安宁河流域泥石流危险性评价[J]. *防灾减灾工程学报*, 2005, 25(4): 426-430, 457.
- [22] 张永波. 考虑不同植被覆被坡体的岷江上游泥石流活动性与易发性研究[D]. 拉萨: 西藏大学, 2023.
- [23] 谢秀峰. 彭州局开展地灾调查评估 为科学防灾提供依据[J]. *资源与人居环境*, 2012(10): 15.
- [24] 董耀刚, 杨军, 严耿升. 甘肃武都区泥石流分布发育特征研究[J]. *甘肃科技*, 2011, 27(6): 50-54.
- [25] 姜丽, 张雄清, 段爱国, 等. 不同林分密度指标在杉木林分蓄积量模型的应用研究[J]. *林业科学研究*, 2022, 35(5): 97-102.
- [26] REINEKE L H. Perfecting a stand-density index for even-aged forests [J]. *Journal of Agricultural Research*, 1933, 46(7): 627-638.
- [27] WU T H. Investigation of landslides on Prince of Wales Island, Alaska, Geotechnical Engineering Report No 5, Department of Civil Engineering [M]. Columbus: Ohio State University, 1976: 94.
- [28] WALDRON L J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1977, 41(5): 843-849.
- [29] 周云艳, 陈建平, 王晓梅. 植物根系固土护坡机理的研究进展及展望[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(6): 1171-1177.
- [30] 程磊, 郝延周. 根系特征参数对土体强度影响的试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(8): 271-276.
- [31] ZHOU Z C, SHANGGUAN Z P. Soil anti-scourability enhanced by plant roots [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2005, 47(6): 676-682.
- [32] DE BAETS S, POESEN J, KNAPEN A, et al. Impact of root architecture on the erosion-reducing potential of roots during concentrated flow [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 32(9): 1323-1345.
- [33] VANNOPPEN W, VANMAERCKE M, DE BAETS S, et al. A review of the mechanical effects of plant roots on concentrated flow erosion rates [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150: 666-678.
- [34] REUBENS B, POESEN J, DANJON F, et al. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review [J]. *Trees*, 2007, 21(4): 385-402.
- [35] STOKES A, ATGER C, BENGOUGH A G, et al. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides [J]. *Plant and Soil*, 2009, 324(1): 1-30.
- [36] CUI W R, CHEN J G, CHEN X Q, et al. Debris flow characteristics of the compound channels with vegetated floodplains [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 868: 161586.
- [37] 徐江, 王兆印. 山区河流阶梯-深潭的发育及其稳定河床的作用[J]. *泥沙研究*, 2003(5): 21-27.

Research on the Growth Characteristics of Vegetation in Debris Flow Gullies and Disaster Mitigation Patterns

ZONG Jiaming^{1,2,3}, CHEN Jiangang^{1,2}, WANG Chenyuan^{1,2,3}, WANG Jinshui^{1,2,3}, WANG Xi'an^{1,2,3}, YANG Fei^{1,2,3}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610213, China; 2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Land Surface Processes, Chengdu 610299, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The vegetation condition of debris flow gullies varies according to the differences in geographical environment and vegetation growth characteristics, which affects the disaster-forming environment of debris flows and the effectiveness of engineering prevention and control, and restricts the development of green disaster mitigation technology. In order to study the growth condition of vegetation in debris flow gullies in different watersheds and its role in disaster mitiga-

tion, the distribution characteristics of vegetation growth in the study area are collected and analyzed through field surveys. The results indicate that: the spacing distribution between different vegetation species is relatively fixed; the influence of tree species' own factors on stand density is more obvious than that of environmental factors, and the stand density of different watersheds ranges from 100 to 5 000 plants/hm²; there is a negative correlation between the vegetation growth condition and the degree of soil fragmentation, with the average diameter at breast height (DBH) of trees in the area of severe gully erosion is smaller than that of the stable area; moreover, it is concluded that the ratio of the root cross-sectional area of the vegetation system: $RAR(\text{tree}) \geq RAR(\text{shrub}) \geq RAR(\text{grass})$. Based on this, a method for assessing gully mitigation patterns is proposed, and the applicability of different mitigation patterns is summarized. The results of the study can provide a certain reference for the green disaster mitigation of debris flows in mountainous areas.

Keywords: debris flow; watershed environment; vegetation distribution; growth characteristics; disaster mitigation pattern

上接第 148 页

- 印发强化气象预警和应急响应联动工作的意见[EB/OL]. (2022-06-20) [2024-03-18]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-06/20/content_5696788.htm.
- [23] 人民网. 预警服务和“叫应”联动 筑牢汛期安全防线[EB/OL]. (2024-07-05) [2024-11-08]. http://hb.cma.gov.cn/xwzx/mtjj/202407/t20240705_6402093.html.
- [24] 中华人民共和国应急管理部. 应急管理部关于推进应急管理信息化建设的意见[EB/OL]. (2021-05-13) [2024-04-27]. https://www.mem.gov.cn/gk/zfxxgkpt/fdzdgknr/202105/t20210513_385059.shtml.
- [25] 河北省人民代表大会常务委员会. 河北省防汛避险人员转移条例[EB/OL]. (2024-01-14) [2024-11-03]. <https://zfcxjst.hebei.gov.cn/hbzjt/ztl/jj/bwplzl/flfg/dfxfg/101719902983898.html>.
- [26] 张海波. 中国第四代应急管理体系: 逻辑与框架[J]. 中国行政管理, 2022(4): 112-122.
- [27] 林亦府, 孟佳辉, 汪明琦. 自助、共助与公助: 日本的灾害应急管理模式[J]. 中国行政管理, 2022(5): 136-143.

Construction of Plan Driven Mechanism in Emergency Response to Meteorological Disasters

ZENG Ming¹, QIU Hongye²

(1. School of Law and Public Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Management Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The hierarchical system driven emergency response is the main mode of emergency response in China's existing meteorological disasters and even most sudden events. Based on the case study of the “7. 20” extremely heavy rainstorm event in Zhengzhou, Henan Province, the advantages and shortcomings of the bureaucratic system driven emergency response model are analyzed and a plan driven emergency response mechanism is constructed as its improvement and supplement. The content of the new mechanism is the linkage between meteorological warning and emergency response. After the warning, all relevant entities within the warning range could directly initiate emergency response according to the plan. At the same time, a response adjustment mechanism should be added after warning errors to correct unreasonable response measures. Compared with the bureaucratic system driven emergency response mode, this mechanism has higher efficiency in emergency response, disperses the risks of response subjects, enhances the initiative of the public, reduces the government's emergency response responsibility, and avoids large-scale mobilization and resource waste.

Keywords: meteorological disasters; emergency response; hierarchy driven; plan driven