藏东南干旱河谷区土壤抗蚀性和水土流失过程模拟

王 帆[1,2], 格桑旺堆[3], 姜群鸥[1,2], 格桑卓玛[3], 尹忠东[1,2]

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.北京林业大学 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083; 3.西藏自治区水土保持局, 西藏 拉萨 850000)

摘 要: [目的]在不同降雨条件下,对藏东南干旱河谷区土壤抗蚀性和水土流失过程进行模拟,为该区域土壤侵蚀防控与生态保护提供科学参考。[方法]通过设置两种雨强(30与60 mm/h);3种坡度(20°,30°,40°),开展人工模拟降雨试验,系统分析坡面产流产沙动态,揭示干旱河谷区坡面土壤侵蚀过程机理。[结果]藏东南干旱河谷区坡面土壤团聚体以>2 mm大颗粒为主,土壤黏聚力为18.39 kPa,内摩擦角为24.7°,表明该区土壤具有一定抗蚀潜力。该类干旱河谷区土壤的结构稳定性主要依赖于团聚体构成和力学特性;在60 mm/h降雨条件下,40°坡面初始产流时间较30 mm/h雨强条件下缩短了44%,表明该区域陡坡-强降雨组合显著加快地表径流形成;随坡度和雨强增加,坡面产流量和产流速率均明显上升;对于藏东南干旱河谷区坡面产沙过程,相较于30 mm/h雨强,在60 mm/h雨强条件下20°,30°和40°坡面30 min累计产沙量增长比例分别达到195.9%,232.5%和282.0%;在不同降雨强度下,相同坡型产沙量、产沙速率变化差异较大。[结论]尽管藏东南干旱河谷区土壤本身结构稳定,抗蚀性良好,但陡坡与强降雨的耦合作用是触发剧烈水土流失的关键,建议采取针对性措施。

关键词: 土壤侵蚀; 产流产沙; 模拟; 藏东南干旱河谷区

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)01-0096-10 **中图分类号:** S157.1

文献参数: 王帆, 格桑旺堆, 姜群鸥, 等.藏东南干旱河谷区土壤抗蚀性和水土流失过程模拟[J].水土保持通报,2026,46(1):96-105. Wang Fan, Gesang Wangdui, Jiang Qunou, et al. Simulation of soil erosion resistance and soil erosion process in arid valley region of southeastern Xizang Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(1):96-105.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.001 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.01.001**

Simulation of soil erosion resistance and soil erosion process in arid valley region of southeastern Xizang Autonomous Region

Wang Fan[1,2], Gesang Wangdui[3], Jiang Qunou[1,2], Gesang Zhuoma[3], Yin Zhongdong[1,2]

(1.*School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*; 2.*Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*; 3.*Soil and Water Conservation Bureau of the Xizang Autonomous Region, Lhasa, Xizang* 850000, *China*)

Abstract: [Objective] The soil erosion resistance and the soil erosion processes in the arid valley region of southeastern Xizang under different rainfall conditions were simulated to provide a scientific reference for soil erosion prevention and control and ecological protection in this area. [Methods] Artificial rainfall simulation experiments were conducted with two rainfall intensities (30 and 60 mm/h) and three slope gradients (20°, 30°, and 40°). The dynamics of runoff and sediment yield on the slopes were systematically analyzed to reveal the mechanism of the soil erosion process on slopes in the arid valley region. [Results] Soil aggregates on the slopes in

收稿日期:2025-06-22 **修回日期:**2025-09-10 **采用日期:**2025-09-10

资助项目:国家自然科学基金项目"气候变化背景下青藏高原东缘生态过渡带空间推移过程中地表水热过程的响应机制"(42371291),"青藏高原东缘生态过渡带不同模式植被恢复过程对土壤水分影响的多尺度效应研究"(41901234);国家重点研发中美合作项目(2019YFE0116500);国家重点研发计划项目(2023YFF1304204)

第一作者:王帆(1999—),女(汉族),山西省太原市人,硕士研究生,研究方向为土壤风蚀模拟。Email:WangfQ@bjfu.edu.cn。

通信作者:尹忠东(1969—),男(汉族),湖南省安仁县人,博士,副教授,主要从事水土保持与荒漠化防治等方面的研究。Email:yaayp@sina.com。

the arid valley region of southeastern Xizang were predominantly large particles (>2 mm). The soil cohesion was 18.39 kPa, and the internal friction angle is 24.7°, indicating a certain potential for erosion resistance in the region's soil. The structural stability of the soil in this arid valley region primarily depended on the composition of aggregates and their mechanical properties. Under 60 mm/h rainfall intensity, the initial runoff generation time on the 40° slope was shortened by 44% compared to that under 30 mm/h intensity, indicating that the combination of steep slopes and heavy rainfall significantly accelerates surface runoff formation in this area. As slope gradient and rainfall intensity increased, both the total runoff yield and runoff rate on the slopes increased significantly. Regarding the sediment yield process on slopes in the arid valley region of southeastern Xizang, compared to the 30 mm/h rainfall intensity, the 30-minute cumulative sediment yield on 20°, 30°, and 40° slopes under the 60 mm/h intensity increased by 195.9%, 232.5%, and 282.0%, respectively. Under different rainfall intensities, the variations in sediment yield and sediment yield rate for the same slope type vary greatly. [Conclusion] Although the soils in the arid valley region of southeastern Xizang possess a stable structure and good erosion resistance, the combined effect of steep slopes and heavy rainfall is the key trigger for severe soil and water loss. Targeted measures need to be taken to reduce runoff and protect the surface.

Keywords: soil erosion; runoff and sediment yield; simulation; arid valley region of southeastern Xizang Autonomous Region

水土流失是全球生态环境和土地资源面临的重大问题[1],不仅降低土地生产力,还影响水文过程及生态系统稳定,其形成受自然因素和人类行为的共同影响,包括降雨、降雪、地貌和植被覆盖以及人类活动的影响,其严重程度日益加剧,尤其在干旱和半干旱河谷区表现更为突出,对区域生态安全与可持续发展构成威胁[2]。

中国水土流失问题也十分严峻,2020年全国水土流失面积为2.69×10^6 km^2,占国土面积28.15%,水力侵蚀面积为1.12×10^6 km^2,占水土流失总面积41.59%[3]。青藏高原水土流失面积达3.11×10^5 km^2,占土地总面积的13.85%[4],且年降水量是该地区土壤侵蚀现象发生的主要驱动因子[5]。藏东南干旱河谷区位于中国西南横断山区,其气候干旱,植被稀疏,生态环境脆弱[6-7]。该区域河谷水流集中,局地降雨强度高,地表径流易形成,土壤易受侵蚀[8],是我国水土流失较为严重的地区之一[9]。因此,开展藏东南干旱河谷区水土流失和侵蚀过程研究具有重要现实意义。

目前,国内外学者[10-13]针对青藏高原水土流失定量分析与模拟开展了大量研究。其中,刘振坤等[14]利用RUSLE模型对青藏高原的土壤进行时空变化规律评估,为更加准确地制定该区域土壤侵蚀预防措施奠定了基础。魏梦美等[15]构建了青藏高原水力侵蚀定量评价方法,包括基于坡面侵蚀模型、^{137}Cs核素示踪法、径流小区和水文站观测3种类型。甄子雲等[16]通过室内人工模拟降雨试验,揭示了青藏高原藏东南高寒草甸区不同植被恢复条件下水土流失过程机理。Xie Shengbo等[17]通过模拟青藏高原冻融侵蚀现象,发现冻胀导致的土壤颗粒间结构破坏是青藏高原土壤力学行为变化的主要原因。Gao Xiaofeng[18]对青藏高原坡面冻融侵蚀进行模拟,估算了不同坡度、降雨强度和解冻土深度下坡面泥沙输移量,解析了青藏高原解冻土壤坡面降雨侵蚀机制。然而,尽管关于青藏高原水土流失研究已有较多积累,但针对干旱河谷区人为扰动坡面的水土流失机理、坡面产流产沙特征及影响因素的系统研究仍十分有限。许航等[19]研究了干旱河谷区不同土地利用方式下土壤抗冲性的变化特征。张好等[20]则通过遥感以及GIS研究干旱河谷区域裸土面积变化、空间分布变化从而反映干旱区水土流失情况。现有研究对藏东南干旱河谷区的坡面水土流失机理涉及较少。因此系统分析藏东南干旱河谷区坡面水土流失过程及其驱动机制,对于科学防控青藏高原水土流失,保障生态安全具有重要理论和实践意义。

鉴于此,本研究选取位于藏东南干旱河谷区的洛隆县(北纬30°10′至31°50′,东经95°10′至95°50′)为研究区域,分析人为扰动坡面土壤团聚体组成、土壤抗直剪能力,揭示研究区土壤抗蚀能力,并基于研究区人为扰动坡面,设置20°,30°和40°这3种不同坡度径流小区,通过30,60 mm/h两种雨强条件下室内人工模拟降雨试验,探究不同雨强、不同坡度条件下坡面产流和产沙过程,分析藏东南干旱河谷区降雨过程中产流与产沙量相关性,揭示坡面细沟间侵蚀机理。从而为青藏高原干旱河谷区土壤侵蚀防控与生态保护提供科学参考。

1 研究区概况

本研究区位于藏东南地区昌都市洛隆县西通坝村(图1),地处青藏高原东南部,位于藏东横断山脉与怒江流域之间,念青唐古拉山与他念他翁山平行,峡谷纵深大,河谷延伸广,东西长约129 km,南北宽约110 km,面积约为8 060 km^2,平均海拔为3 900 m。研究区地质条件复杂,多高山峡谷,地势南北高,中部低,呈现扇形向东北倾斜,起伏剧烈,境内峰壑纵横,河流密布,湖泊分布零散,坡面径流汇集效率高,为土壤侵蚀提供动力条件。该地区属于高原温带半干旱气候,光照充足,空气稀薄,年平均气温约5 ℃,昼夜温差大,年均降水量达223.7 mm,集中在5—9月,夏季雨季分明,冬季寒冷漫长,短时强降雨事件频发,干旱、大风、山洪、暴雨、冰雹等自然灾害显著,增加土壤侵蚀风险。该区域受念青唐古拉山脉影响,主导风向为东南风,对表层土壤侵蚀具有一定影响。季节性冻土期为每年10月上旬至翌年4月上旬,冻土融解影响坡面土壤水分动态及降雨入渗过程,为坡面产流及侵蚀提供条件。因气候干旱,植被稀少,主要以耐旱的灌木和草本植物为主。区域植被覆盖率低,主要由耐旱灌木和草本植物组成,植被稀疏使坡面土壤裸露面积增大,生态脆弱,易受降雨及径流影响发生侵蚀。土壤类型主要为冲积土,质地从砂壤土到壤土不等,表层团聚体结构相对稳定,但强降雨条件下易发生表层剥蚀及沟谷侵蚀;道路建设、农田开垦及放牧等人为活动扰动明显,加剧了坡面裸露和水土流失问题。

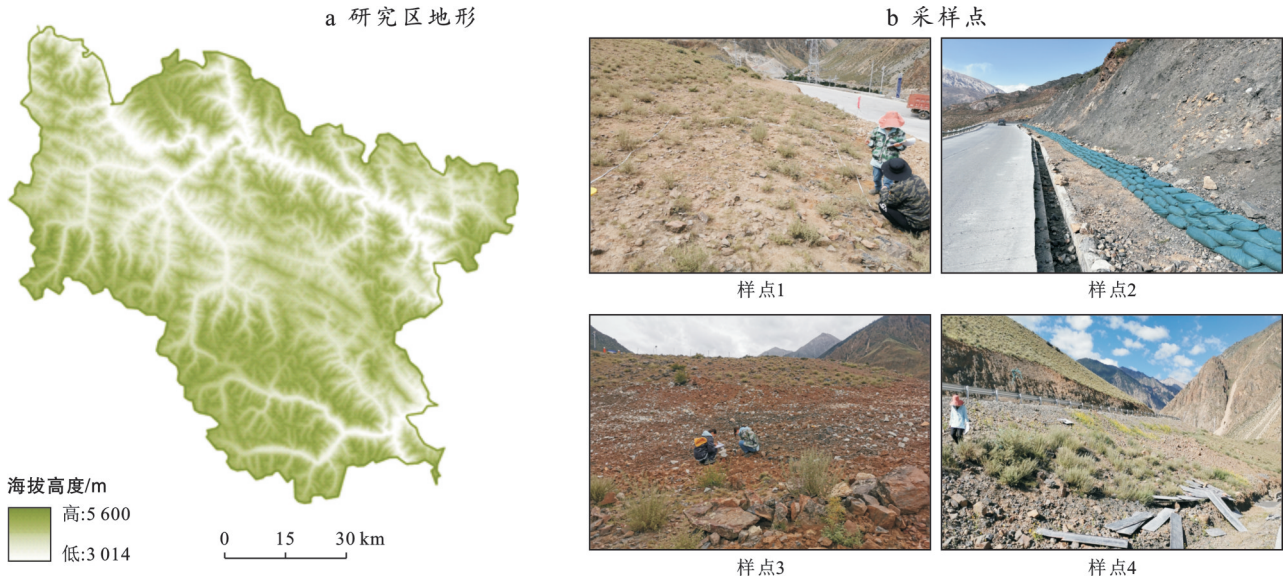


图1 研究区地形及采样点水土流失概况图

Fig.1 Topography of study area and overview of soil and water loss at sampling plots

2 材料与方法

2.1 试验材料

试验装填土样于2023年7月取自洛隆试验点原位表层,多为由冲积或前冲积母质发育而成的土壤,典型色调为黑棕色至深棕色。根据粒径分布,将该土壤划分为砂质壤土。用取土铲在垂直剖面按不同深度(10,20和30 cm),采集地表0—30 cm土样,采集后根据不同深度分层混合,形成土壤样本,后经过自然风干,过筛去除石头、杂草和其他碎片。填装过程采用底部预置纱布层与5 cm细砂层模拟天然透水层,土壤按5 cm厚度分层铺设,每层轻度夯实以消除空气间隙,同时保持土壤团聚体结构完整,模拟天然坡面层状结构。使用环刀法测定每层干容重,并根据测量结果调整夯实力度,使整体坡面干容重达到1.20 g/cm^3,使土体结构接近野外扰动状态,保证试验结果的可推广性。将预处理后的土壤逐层填入试验坡面,并按上述分层、夯实及容重控制方法处理。

2.2 研究方法

在研究区试验点,于2023年7月分别用环刀和取土铲采集了人为扰动坡面1—10 cm表层土壤,测定了土壤团聚体、水稳性团聚体和直剪特性。其中团聚体组成采用干筛法(ASTMD421-85)测定,水稳性团聚体(WSA)通过湿筛法[21]分析,直剪试验依据《土工试验方法标准(GB/T 50123—2019)》,选取4 mm剪切位移对应峰值强度[22]。

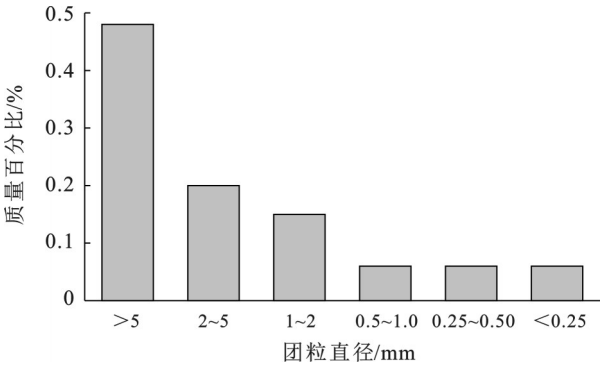
试验设置3种坡度,即20°,30°和40°坡,坡面为1.5 m×0.5 m的无植被裸坡,采用人工无植被裸坡设

计可控制变量,排除植被影响,以便定量分析坡度与降雨强度对径流和产沙的直接作用。降雨试验中,所有坡面均按统一模拟雨强、降雨持续时间及土壤前期湿润条件进行,其中土壤前期湿度的保持通过计算重量差来实时补水,即每天补足土壤中蒸发蒸腾所损失的水分,以排除外部条件差异对初始产流时间的影响。坡度设置根据试验区地形进行模拟,接近试验区自然状态以提高试验结果的真实性。试验通过压力式人工模拟降雨系统开展,装置配备10个喷头,通过压力调节雨滴粒径和降雨强度接近自然降雨,保证试验模拟逼近实际条件,提高试验结果可靠性。基于研究区多年历史降水数据,选定30和60 mm/h两种雨强,以模拟不同强度降雨下坡面产流和土壤侵蚀过程,降雨高度设置为9 m,试验前对降雨强度进行校准,误差控制在±5%以内。试验开始前,用透明薄膜覆盖坡面,待降雨强度稳定后移除薄膜并启动计时。记录初始产流时间,持续模拟30 min降雨,每2 min采集径流样本,分析产流动态和瞬时产沙速率,为探究坡度与雨强对水土流失影响提供高时间分辨率数据。径流体积通过容量收集器测量,并实时记录流量,泥沙样品采取分层取样法,每2 min采集1次一定体积的径流泥沙样。样本经明矾絮凝、静置沉淀后分离泥沙,105 ℃烘干至恒重,称量计算各时段产沙量。用于计算不同坡度和降雨强度下的产沙率。径流及泥沙测定均重复3次以保证数据的可靠性。

3　结果与分析

3.1　研究区土壤性质分析

土壤团聚体组成特征分析表明(图2),在0—10 cm表层土体中,大粒级团聚体(>5 mm)、中粒级团聚体(2~5 mm),二者累积比例达63.00%;而次中粒级团聚体(1~2 mm)比例为16%;微团聚体(0.5~1 mm)、细团聚体(0.25~0.5 mm)及粉黏粒级(<0.25 mm)各粒级比例均为6.00%。在土壤团聚体分类中,通常根据粒径大小将其划分为不同等级,粒径>2 mm的团聚体被称为大团聚体,通常较为稳定[23]。该分布特征显示,研究区域土壤以结构性团聚体为主体,表征出较好的土壤结构稳定性。基于国际通用的土壤团聚体稳定性评价体系,采用平均重量直径(mean weight diameter, MWD)计算模型(由于仅测表层土壤,MWD和WSA结果不能完全代表整个坡面土壤团聚体稳定性,仅用于表层抗蚀性评估),获得研究区土壤的平均重量直径值为0.505 mm,处于藏东南地区典型抗蚀性土壤的MWD阈值范围(0.45~0.65 mm,参考《青藏高原土壤侵蚀区划》);基于湿筛法测定的>0.25 mm水稳性团聚体(water-stable aggregates, WSA)含量为68.42%,参照国际土壤结构分类标准(WSA>50%为抗侵蚀能力较强),表明该区域土壤具有较好的水稳性团聚体构成。土壤水稳性团聚体是反映土壤抗水蚀能力的关键指标之一,因此该区域抗水蚀潜力较高。



注:图中数据仅反映表层0—10 cm土壤团聚体分布。深层未测。

图2　藏东南干旱河谷区未扰动土壤粒径比例

Fig.2　Proportion of undisturbed soil particle size in arid valley region of southeastern Xizang Autonomous Region

本研究采用标准环刀取样法获取原状土样16组,通过全自动应变控制式直剪仪测定土壤抗剪强度。设定垂直压力为100,200,300,400 kPa,记录剪切过程中剪应力和剪切位移(图3)。依据《土工试验方法标准(GB/T 50123—2019)》中"峰值强度法"要求,选取剪切位移为4 mm时的剪应力(kPa)进行线性拟合,该位移代表土体临界破坏状态。试验结果显示(图3),当垂直压力为100 kPa时,对应的剪应力为64.6 kPa;垂直压力为200 kPa时,对应的剪应力为104.9 kPa;垂直压力为300 kPa时,对应的剪应力为163.2 kPa;垂直压力为400 kPa时,对应的剪应力为197.3 kPa,线性拟合得到藏东南干旱河谷区土壤黏聚力为18.39 kPa,内摩擦角φ=24.7°。这说明试验区土壤抗剪强度较大,反映出土层具有较好的承载能力和稳定性。

3.2　不同坡度坡面初始产流时间对比分析

对比不同坡度在不同降雨强度下初始产流时间,试验坡面条件包括坡度、土壤类型、土壤湿度、及表层植被覆盖情况,所有试验在标准控制条件下进行(降雨强度30和60 mm/h,持续时间30 min,土壤预湿至田间持水量)。初始产流时间与坡面条件密切相关。如坡度增大或表层覆盖减少,会导致产流提前。试验中已通过控制坡面湿度和植被覆盖,使不同坡面间可比性增强。结果表明,在两种雨强条件下,初始产流时间均随坡度增加而缩短(图4),这

主要是由于地表径流重力势梯度增大,导致坡面汇流速度提高。而对于同一坡度坡面,其在60 mm/h降雨条件下初始产流时间均少于30 mm/h雨强。具体来看,在30 mm/h雨强条件下,随着坡度增加,初始产流时间呈下降趋势,但下降幅度相对较小。20°坡面初始产流时间为155 s,30°坡面初始产流时间仅缩短16 s,40°坡面降为125 s。在60 mm/h雨强条件下,20°,30°和40°坡面初始产流时间分别为其在30 mm/h雨强条件下的77%,64%,56%。就降雨强度影响而言,高强度降雨(60 mm/h)雨滴动能较30 mm/h雨强条件增强2.25倍,剧烈雨滴击溅作用显著破坏了土壤团聚体结构,形成致密结皮层,致使土壤稳渗率锐减;且径流量迅速增加,短时间内来不及下渗,直接形成地表径流,故初始产流时间较短。

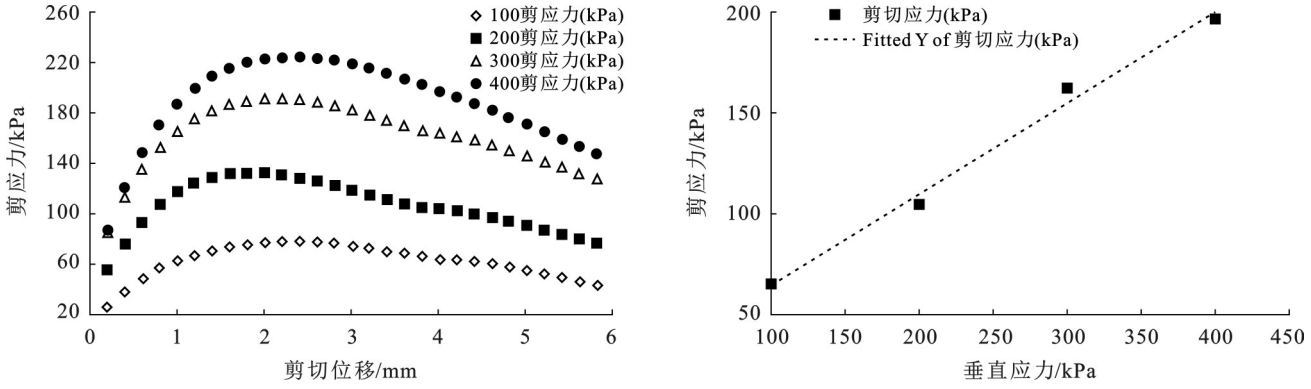
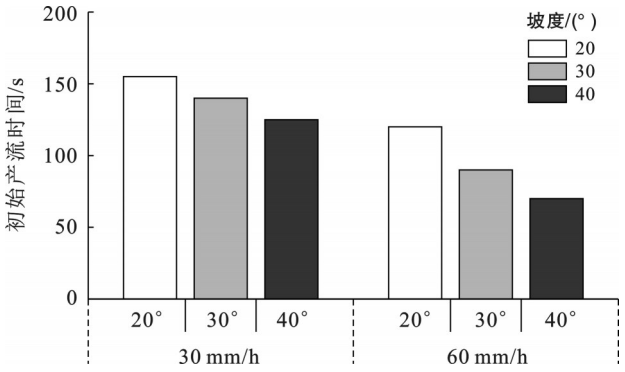


图3 未扰动土壤内聚力与内摩擦角对比

Fig.3 Comparison of cohesion and internal friction angle in undisturbed soil



注:图中初始产流时间反映标准控制条件下的测定结果。坡面坡度、土壤湿度和植被覆盖保持一致。

图4 不同坡度和降雨强度下初始产流时间

Fig.4 Initial runoff generation time under different slopes and rainfall intensities

3.3 不同降雨强度条件下不同坡度坡面产流过程分析

本研究分别模拟了30和60 mm/h降雨强度下,20°,30°和40°坡面产流过程,分析初始产流后30 min不同坡面产流量、产流速率以及累计产流量变化特征。

(1)产流率。

$$Q_r = V_r / t \quad (1)$$

式中:Q_r为产流率(ml/min);t为接样时间(min);本试验为2 min。

(2)累计产流量。

$$Q_{mr} = \sum M_{r_i} \cdot \Delta t \quad (2)$$

式中:Q_{mr}为累计产流量(ml);M_r为产流量(ml);t为时间(min)。

试验结果显示,降雨强度变化对藏东南干旱河谷区坡面产流过程影响显著(图5)。相比于30 mm/h雨强,在60 mm/h雨强条件下,20°,30°和40°坡面30 min累计产流量增加比例分别达到173.0%,117.7%和131.6%,表明坡度较小或者坡度较陡时,降雨强度对累计产流量影响幅度均较大。在30 mm/h雨强条件下,20°坡面产流量随着降雨历时增加而快速增加,在降雨历时达到14 min时,达到峰值280 ml,随后呈下降趋势,到16 min时,降低到100 ml,随后又呈小幅度波动上升趋势,到30 min达到130 ml。对于30°和40°坡面,初始产流时期产流量相对接近,分别为220和240 ml,为20°坡面初始产流时期产流量的约两倍。随着降雨历时增加,30°坡面呈小幅度增加后,12 min后又有小幅度降低,30 min产流量为210 ml;而40°坡面产流量4 min增加幅度较大,16 min后也呈波动下降趋势,30 min产流量为260 ml。总体来看,在30 mm/h雨强条件下,波动性较显著,且随坡度增加,坡面产流量基本呈逐渐增加趋势,但30°坡面相比于20°与40°坡面,产流量增加幅度相对稳定。在60 mm/h雨强条件下,20°坡面初始产流时期产流量为300 ml,且随降雨历时增加而逐渐增加,在降雨历时达到18 min时,达到峰值500 ml,随后逐渐降低至一稳定水平,到30 min达到410 ml。30°坡面与20°坡面初始产流时期产流量相对接近,为320 ml,随着降雨历时增加,30°

坡面产流量大幅度增加,20 min到达峰值620 ml后又剧烈下降,30 min产流量为490 ml;而40°坡面初始产流时期产流量相对较高,为400 ml,随降雨历时增加,其坡面产流速率较30 mm/h提高267%,坡面产流量快速增加达到峰值760 ml,随后呈下降趋势,到24 min小幅度上升后又呈现下降趋势,30 min产流量为600 ml。总体来看,在强雨强条件下,随着坡度增加,各坡面产流量增长速度均呈先逐渐增加后小幅度降低趋势,较弱雨强条件产流量显著升高。

对于坡面产流量速率,其变化趋势相对稳定。在30 mm/h雨强条件下,20°坡面初始产流时产流速率相对较低,仅为115 ml/(min·m^2),而30°和40°坡面初始产流时产流速率分别达到220和240 ml/(min·m^2)。随降雨历时增加,其产流速率均呈快速增长趋势,在10～15 min达到峰值,20°,30°和40°坡面产流速率分别达到176,252和301 ml/(min·m^2)。之后逐渐趋于稳定或小幅度下降。在60 mm/h雨强条件下,3个坡度初始产流时期产流速率相对接近,分别为300,320和400 ml/(min·m^2)。随降雨历时增加,产流速率均有较大幅度增长,且坡度越大,增长幅度越大。而到16 min坡面产流速率均趋于稳定状态,分别为400,520,640 ml/(min·m^2)。相比60 mm/h雨强,30 mm/h雨强时坡面产流速率变化幅度相对较小。

对于坡面累计产流量,其变化趋势基本一致。在30 mm/h雨强条件下,坡面累计产流量大致均呈线性增长趋势,变化速率相对稳定。20°坡面在14 min出现小峰值后增长趋势变缓。随坡度增加,累计产流量增长速率也逐渐增加,20°,30°和40°坡面30 min坡面累计产流量分别为2 255,3 565和4 150 ml。在60 mm/h雨强条件下,坡面累计产流量也均呈线性增长趋势,随坡度增加,累计产流量增长速率也逐渐增加,20°,30°和40°坡面30 min累计产流量分别为6 160,7 760和9 610 ml,相比于30 mm/h雨强条件下,呈大幅度增长趋势。

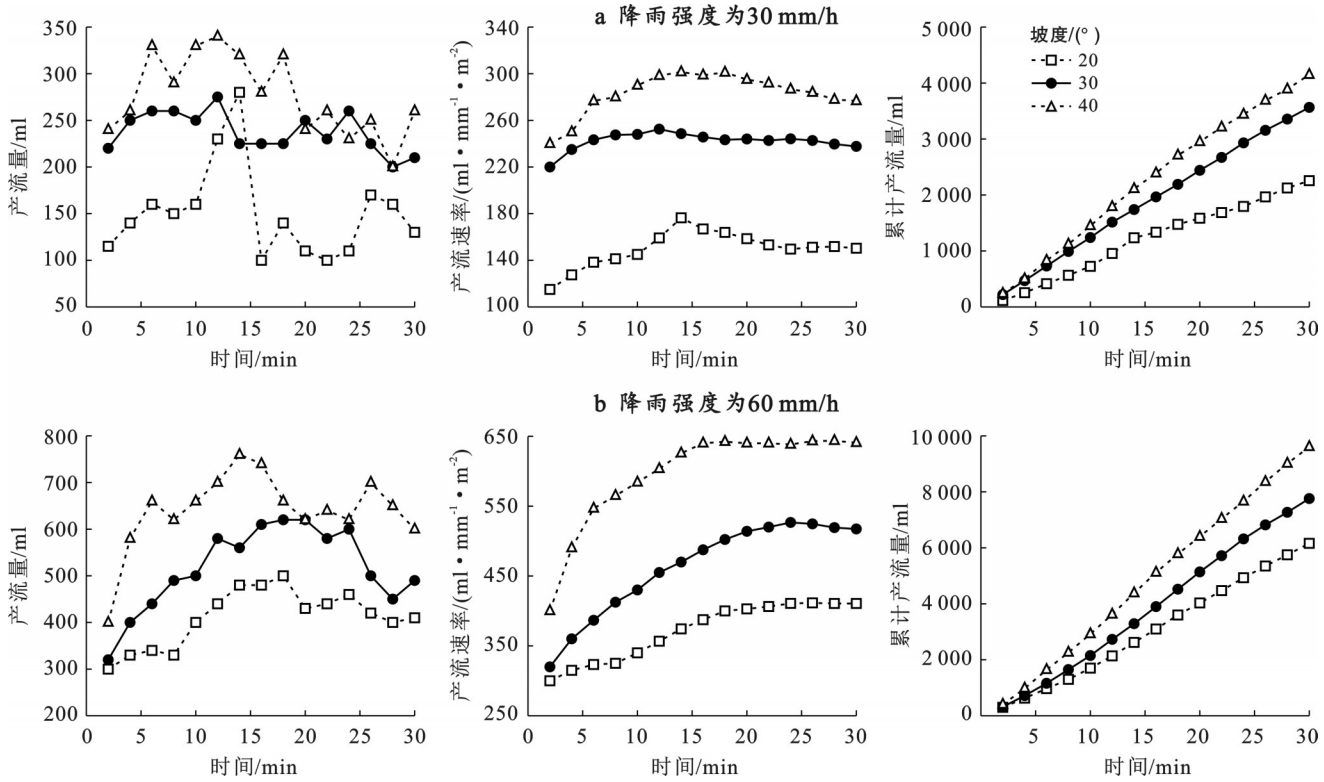


图5　30和60 mm/h降雨强度下20°,30°和40°坡面产流过程

Fig.5　Runoff generation process on 20°, 30° and 40° slopes under rainfall intensities of 30 mm/h and 60 mm/h

3.4　不同降雨条件下不同坡度坡面产沙过程分析

本研究还通过模拟30和60 mm/h强度人工降雨,探究20°,30°和40°坡面产沙过程,分析初始产流后30 min内产沙量、产沙速率和累计产沙量变化特征(图6)。

(1)产沙率。

$$Q_s = M_s / t \quad (3)$$

式中:Q_s为产沙率(g·min^{-1});M_s为泥沙重量(g);t为时间(min)。

(2)累计产沙量。

$$Q_{ms} = \sum M_{s_i} \cdot \Delta t \quad (4)$$

式中:Q_{ms}为累计产沙量(g);t为时间(min)。

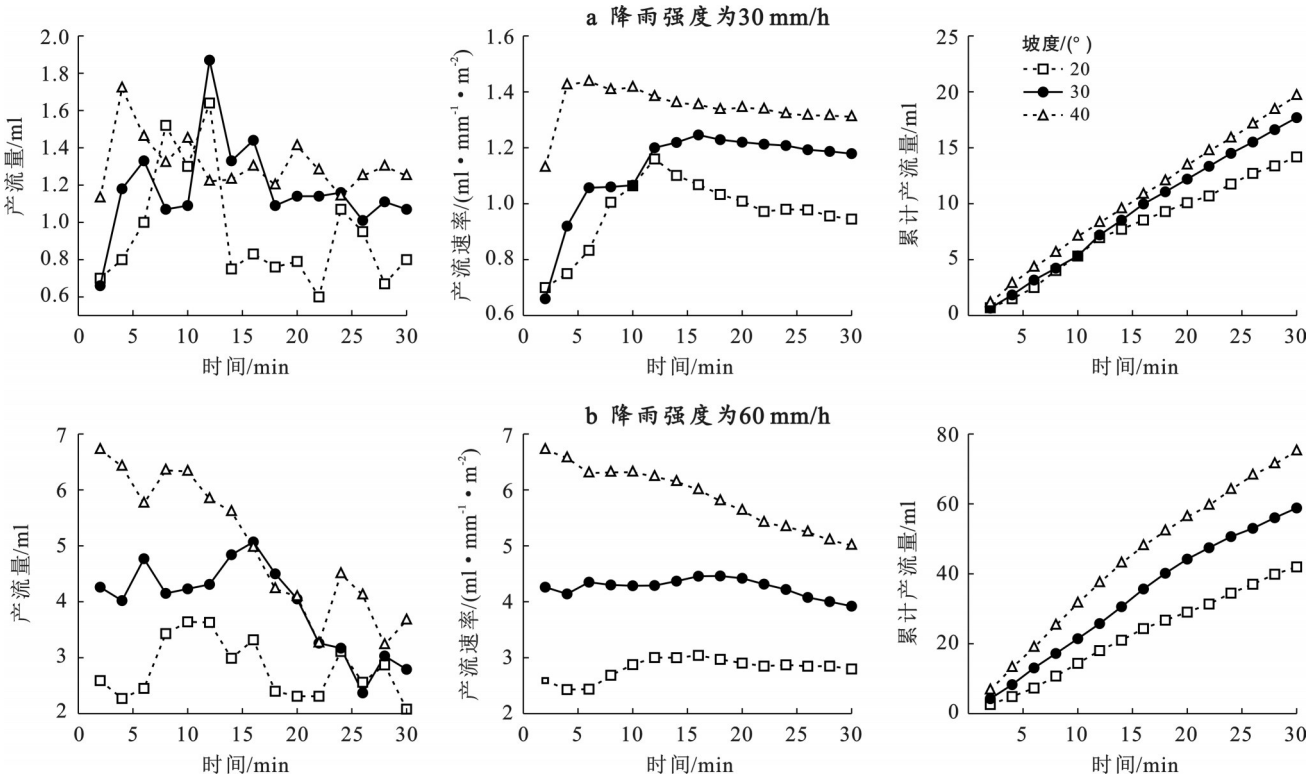


图6 30 mm/h和60 mm/h降雨强度下20°,30°和40°坡面产沙过程

Fig.6 Sediment yield process on 20°, 30° and 40° slopes under rainfall intensities of 30 mm/h and 60 mm/h

试验结果显示,降雨强度对藏东南干旱河谷区坡面产沙过程影响也相对显著。相比于30 mm/h雨强,在60 mm/h雨强条件下,20°,30°和40°坡面30 min累计产沙量增加比例分别达到195.9%,232.5%和282%,表明随坡度增加,累计产沙量增长幅度也显著增加,且增加比例也显著提升。在30 mm/h雨强条件下,20°坡面初始产流时的产沙量为0.70 g,随降雨历时增加而快速增加,在初始产流后12 min时达到峰值1.64 g,随后急剧下降,到22 min时,降到最低值0.60 g,随后呈小幅度波动,到30 min为0.80 g。30°坡面与20°坡面初始产沙量相对相近,为0.66 g,随后呈波动型急剧上升,在降雨历时12 min时达到峰值1.87 g,而后急速下降,在18 min时达到低点1.09 g后,产沙量维持稳定水平,到30 min达到1.07 g。对于较陡坡面(40°),其初始产流时产沙量较高,为1.13 g,随后短暂上升至高峰1.72 g后,逐渐下降至1.32 g并产生小幅度波动,到30 min达到1.25 g。在60 mm/h雨强条件下,不同坡度坡面初始产流时的产沙量均较大,但随降雨历时增加而降低。20°坡面初始产流时的产沙量为2.59 g。随降雨历时增加,在10 min达到峰值3.64 g,随后呈波动式小幅度下降,30 min达到2.08 g。对于30°坡面,其初始产流时的产沙量较高,为4.26 g,随后呈波动式增长,在16 min达到峰值5.07 g,而后呈急速下降趋势,在26 min到达最低点2.37 g,随后又呈小幅度上升趋势,30 min时达到2.79 g。对于40°坡面,其初始产流时产沙量最高,为6.72 g,随后急剧下降,在22 min达到最低点3.26 g后,呈小范围波动趋势,在30 min产沙量为3.67 g。总体看来,40°坡面下降趋势最明显,而20°坡面相对较为稳定。

对于坡面产沙量速率,其变化趋势相对稳定。在30 mm/h雨强条件下,不同坡面均随降雨历时增加而先急剧增长后趋于稳定,且有小幅度下降趋势。对于20°坡面,初始产流后其产沙速率与30°坡面相近,分别为0.70和0.66 g/(min·m²)。随后20°坡面在降雨历时2~12 min期间,急剧上升至1.16 g/(min·m²),在12 min后呈缓慢下降趋势,到30 min产沙速率为0.90 g/(min·m²)。而对于30°坡面,在降雨历时12 min后其产沙速率趋于稳定水平,在30 min产沙速率为1.20 g/(min·m²)。40°坡面初始产流时的产沙速率最高,为1.13 g/(min·m²),历时2 min后产沙速率达到1.4 g/(min·m²),之后产流速率几乎稳定在同一水平,到30 min产沙速率为1.30 g/(min·m²)。60 mm/h雨强条件下,40°坡面初始产流时的产沙量(6.72 g)是30 mm/h的雨强下的5.9倍,但随降雨历时增加下降了54.00%,反映表层松散物质快速冲刷后,颗粒粗化,抗蚀能力增强。此现象与Rill-Gully演化模型一致,表明强降雨—陡坡条件下细沟间发育

主导侵蚀过程。对于坡面累计产沙量,其变化趋势基本一致。在 30 mm/h 雨强条件下,坡面累计产沙量大致均呈线性增长趋势。初始产流时,其产沙量差异不大,且随降雨历时增加,其累计产沙量差异也相对较小,到 30 min 时坡面累计产沙量分别为 14.2,17.7,19.7 g。在 60 mm/h 雨强条件下,不同坡度坡面也均呈线性增长趋势。随坡度增加,累计产沙量增长速率也逐渐增加,且不同坡度坡面累计产沙量差异性也相对较大,20°,30°和 40°坡面 30 min 累计产沙量分别为 42.0,58.8,75.1 g。

4　讨　论

(1) 研究发现,土壤中丰富的胶结物质,通过化学键合[24]与物理吸附作用[25]增强了土粒间联结力[26],从而达到抵抗颗粒分离,构建稳定团粒结构,提高土壤对水分和营养物质的固持作用。可使该地区土壤具有较好的抗分散能力[27]。尽管如此,水稳性团聚体含量较高,表明在极端强降雨和陡坡条件下,土壤具有一定的抗侵蚀能力。尽管藏东南地区土壤结构稳定性优于青藏高原其他区域,水稳性团聚体含量低于典型农耕土壤,表明该地区土壤的抗水蚀能力在面临极端降雨和陡坡条件时仍然面临挑战。尤其在 60 mm/h 强降雨和 40°坡的组合下,土壤侵蚀量显著增加,验证了土壤粒级和结构对水蚀过程的重要影响。

(2) 坡度与降雨强度增加对初始产流时间具有显著缩短效应,符合 Horton[28]超渗产流理论的基本规律。本研究结果显示,40°坡面在 60 mm/h 雨强条件下产流时间缩短至 30 mm/h 时的 56%,其缩短幅度远高于甄子雲等[16]在藏东南高寒草甸区相似坡度和雨强下坡面试验观测值。差异源于两方面,干旱河谷区植被稀疏,地表缺乏草甸植被对降雨动能和产流的有效削减和入渗促进;强降雨雨滴动能对表层结构性团聚体的剧烈击溅破坏,加之陡坡形成的重力势梯度增大,加速了优先流通道形成,共同导致土壤稳渗率急剧下降,从而缩短了产流时间,这一现象与当地短历时强降雨频发的气候特征耦合,强降雨破坏土壤团聚体并加速优先流形成,提高了陡坡—暴雨组合下土壤侵蚀风险。

(3) 藏东南干旱河谷区坡度大,降水强的地区减流效益较低,发生水土流失风险较大。累计产流量对雨强和坡度的非线性响应阐释了复杂坡面水文过程。与魏梦美综述的青藏高原水力侵蚀定量方法相比,本研究通过高时间分辨率采样,捕捉到产流速率在不同雨强下的动态变化过程,在藏东南干旱河谷区,坡度大、降水强的地区,其减流效益较低,水土流失风险显著增大。研究表明,坡度和降雨强度对水文过程的非线性响应使得坡面水流加速,土壤侵蚀加剧。低雨强下产流稳定,高雨强下优先流发育加速径流集中,虽然 40°陡坡累计产流量最高,但其在 60 mm/h 雨强下增速趋于稳定,与 Horton 理论中达到稳定入渗后径流趋于稳定的观点相符,同时也暗示了相较于高寒草甸区植被恢复较好的坡面,藏东南干旱河谷区陡坡上可能更快达到输水能力的极限或发生细沟化。

(4) 累计产沙量随坡度和雨强增长而显著增加,有力证明了侵蚀动力的非线性增长。在 30 mm/h 雨强下,不同坡度产沙量均呈现先急剧上升后小幅度下降至稳定的趋势,这与初期易蚀物质的快速冲刷消耗,以及后期地表颗粒粗化或微地形调整有关[29]。而在 60 mm/h 雨强下,初始产流时的产沙量相对较高且随历时呈显著下降趋势,这一现象与 Rill-Gully 演化模型高度吻合。高强度降雨和陡坡地形极大促进了细沟间侵蚀和细沟快速发育[30]。在产流初期,大量表层结构性团聚体被剥离,导致颗粒粗化,并暴露出更为致密且抗蚀性较强的底层土壤(试验土壤含砾石 25%～35%),这一现象表明在高强度降雨和陡坡地形的共同作用下,细沟间的侵蚀加剧,且细沟发育迅速,这与 Rill-Gully 演化模型相符。尽管藏东南干旱河谷区土壤固有抗蚀性优于青藏高原其他区域,但在陡坡、低植被覆盖和短历时强降雨的特殊环境下,加之人为活动的干扰,土壤侵蚀风险明显较高,特别是在 60 mm/h 降雨强度下,陡坡表面水土流失加剧,进一步凸显了该区域在水土流失防控上的紧迫性。

综上所述,坡度增大和降雨强度加大均会显著加快初始产流时间并增加产沙量。

5　结　论

(1) 研究区表层土壤以大粒级团聚体、中粒级团聚体为主,二者累计比例达 63.00%,水稳性较好,表现出一定抗水蚀能力。

(2) 随着坡度增大和降雨强度提升,初始产流时间明显缩短。例如:40°坡面在强降雨下产流时间仅为低雨强条件的 56%,表明陡坡和强降雨增加了侵蚀风险。

(3) 高雨强条件下,30 min 累计产流量显著增加(20°,30°,40°坡面分别增加 173%,118%,132%),陡坡上增速趋稳,提示水土流失风险上升。

(4) 产沙量随坡度和雨强增加而上升,高强度降雨条件下增幅显著(20°～40°坡面分别增 196%～

282%),在低雨强下产沙先升后稳。尽管土壤抗蚀性较好,但陡坡、低植被覆盖和强降雨仍导致侵蚀显著,需结合工程措施进行针对性防控。

本次试验分析了研究区土壤抗蚀性,通过模拟降雨试验,研究了藏东南干旱河谷区不同雨强、不同坡度坡面侵蚀过程。但本试验为短历时的模拟降雨,主要反映了次降雨事件的侵蚀过程,无法揭示藏东南干旱河谷区不同植被覆盖下土壤侵蚀的长期季节性变化和年际变化。例如干湿循环、冻融作用、植被演替等长期因素对土壤抗蚀性的影响。因此建议建立长期观测站,监测不同季节和年份以及不同植被覆盖下的真实降雨事件下的土壤侵蚀,验证室内试验结论,并研究其长期效应。

参考文献(References)

[1] 周连兄.基于景观美学的流域综合治理及其效果评价:以河北省滦平县两间房川流域为例[D].北京:北京林业大学,2021.
Zhou Lianxiong. Comprehensive watershed management based on landscape aesthetics and its effect evaluation: A case study of Liangjiangchuan watershed in Luanping County, Hebei Province [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.

[2] 朱兆棋.安宁河干旱河谷区典型农用地土壤抗冲性研究[D].四川 南充:西华师范大学,2023.
Zhu Zhaoqi. Study on Soil Anti-scourbility of typical agricultural land in the dry valley of the Anning River [D]. Nanchong, Sichuan: China West Normal University, 2023.

[3] 张慧利.感知价值、生计策略与农户水土保持技术采纳行为[J].水土保持研究,2025,32(3):404-412.
Zhang Huili. Perceived value, livelihood strategy and farmers' adoption behavior of soil and water conservation technologies [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(3): 404-412.

[4] 水利部.2020年全国水土流失动态监测成果显示我国生态环境状况持续向好[J].河南科技,2021,40(17):2.
The Ministry of Water Resources. The results of the 2020 national dynamic monitoring of soil erosion show that the ecological environment in China continues to improve [J]. Henan Science and Technology, 2021, 40(17): 2.

[5] 赵萌萌,张根.乡村振兴战略下雅鲁藏布江贡嘎段流域水土保持策略探讨[J].农业灾害研究,2023,13(7):266-268.
Zhao Mengmeng, Zhang Gen. Discussion on soil and water conservation strategy of Gongga section of the Yarlung Zangbo River under the strategy of rural revitalization [J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2023, 13(7): 266-268.

[6] 刘悦俊,程江浩,张燕杰.青藏高原土壤侵蚀对气候变化和生态政策的非线性响应[J].水土保持研究,2024,31(4):126-134.
Liu Yuejun, Cheng Jianghao, Zhang Yanjie. Nonlinear response of soil erosion in the Tibetan Plateau to cliamte change and ecological policies [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(4): 126-134.

[7] 杨兆平,常禹,布仁仓,等.岷江上游干旱河谷区域空间变化的定量判定[J].生态学报,2007,27(8):3250-3256.
Yang Zhaoping, Chang Yu, Bu Rencang, et al. Long-term dynamics of dry valleys in the upper reaches of Minjiang River, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(8): 3250-3256.

[8] 刘伦辉.横断山区干旱河谷植被类型[J].山地研究,1989,7(3):175-182.
Liu Lunhui. Vegetational types of the arid valleys in the Hengduan mountainous region [J]. Journal of Mountain Research, 1989,7(3): 175-182.

[9] 张哲茵,衣鹏,陈鹏.基于^{137}Cs示踪法的青藏高原东南部土壤侵蚀状况[J].湖北农业科学,2023,62(4):43-49.
Zhang Zheyin, Yi Peng, Chen Peng. Soil erosion of Southeastern Qinghai-Tibet Plateau based on ^{137}Cs tracer method [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2023, 62(4): 43-49.

[10] 殷兵.近30年青藏高原水力侵蚀时空变化及成因[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2024.
Yin Bing. Spatiotemporal variations and causes of water erosion on the Qinghai-Tibet Plateau in recent 30 years [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2024.

[11] 王晓峰,尧文洁,冯晓明,等.青藏高原生态系统服务供需变化及其驱动因素[J].生态学报,2023,43(17):6968-6982.
Wang Xiaofeng, Yao Wenjie, Feng Xiaoming, et al. Changes and driving factors of ecosystem services supply and demand on the Tibetan Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(17): 6968-6982.

[12] 谢李园,张路,万五星,等.青藏高原生态修复格局空间优化[J].环境保护科学,2023,49(2):78-86.
Xie Liyuan, Zhang Lu, Wan Wuxing, et al. Spatial optimization of ecological restoration patterns on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Environmental Protection Science, 2023,49(2): 78-86.

[13] 朱殿珍,初磊,马帅,等.青藏高原生态屏障区生态系统服务权衡与协同关系[J].水土保持研究,2021,28(4):308-315.
Zhu Dianzhen, Chu Lei, Ma Shuai, et al. Tradeoff and synergistic relationship among ecosystem services [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(4): 308-315.

[14] 刘振坤,刘峰,郑光辉,等.基于RUSLE模型的青藏高原土壤保持功能定量评价[J].土壤,2024,56(1):173-181.
Liu Zhenkun, Liu Feng, Zheng Guanghui, et al. Quantitative evaluation of soil conservation function in the Qinghai-Tibet Plateau based on RUSLE model [J]. Soils, 2024,56(1): 173-181.

[15] 魏梦美,符素华,刘宝元.青藏高原水力侵蚀定量研究进展[J].地球科学进展,2021,36(7): 740-752.
Wei Mengmei, Fu Suhua, Liu Baoyuan. Quantitative research of water erosion on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Advances in Earth Science, 2021,36(7): 740-752.

[16] 甄子雲,赵洋,姜群鸥,等.野外模拟降雨条件下高寒草甸区植被退化和人工植被恢复坡面的产流产沙过程[J].水土保持学报,2024,38(4): 153-161.
Zhen Ziyun, Zhao Yang, Jiang Qun'ou, et al. Field simulation of runoff and sand production on degraded and revegetated slopes in alpine meadows under rainfall conditions [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(4): 153-161.

[17] Xie Shengbo, Qu Jianjun, Lai Yuanming, et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil mechanical and physical properties in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Mountain Science, 2015,12(4): 999-1009.

[18] Gao Xiaofeng, Shi Xiaonan, Lei Tingwu, et al. Influence of thawed soil depth on rainfall erosion of frozen bare meadow soil in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2021,46(10): 1953-1963.

[19] 许航,秦岭,何淑勤,等.大渡河干旱河谷区不同土地利用方式下土壤抗冲性特征[J].干旱区资源与环境,2023,37(10): 102-108.
Xu Hang, Qin Ling, He Shuqin, et al. Soil anti-scourability under different land use types in arid valley area of Dadu River [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023,37(10): 102-108.

[20] 张好,杨小芳,罗智,等.基于RS的茂县干旱河谷裸土时空变化分析[J].四川林业科技,2023,44(1): 91-97.
Zhang Hao, Yang Xiaofang, Luo Zhi, et al. Spatial and temporal dynamic analysis of bare soil area in Maoxian arid valley based on RS [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2023,44(1): 91-97.

[21] 白芹菲,王艳琪,鲍玉海,等.黑龙滩水库消落带植被恢复模式对土壤水稳性团聚体组成及其稳定性的影响[J].水土保持学报,2024,38(3): 168-176.
Bai Qinfei, Wang Yanqi, Bao Yuhai, et al. Effects of vegetation restoration patterns on soil water-stable aggregates composition and their stability in the water level fluctuation zone of the Heilongtan Reservoir [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(3): 168-176.

[22] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室.土壤物理性质测定法[M].北京:科学出版社,1978.
Laboratory of Soil Physics, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Determination of soil physical properties [M]. Beijing: Science Press, 1978.

[23] 梁春林,王彬,张文龙.东北黑土区坡耕地土壤团聚体稳定性与结构特征[J].中国水土保持科学(中英文),2020,18(6): 43-52.
Liang Chunlin, Wang Bin, Zhang Wenlong. Stability and structural characteristics of soil aggregates on sloping farmland in black soil region, Northeast China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020,18(6): 43-52.

[24] 杜少烨.绿色屋顶团粒型基质层构建及其评价体系的研究[D].江西 南昌:南昌大学,2024.
Du Shaoye. Research on the construction and evaluation system of granular substrate layer for green roofs [D]. Nanchang, Jiangxi: Nanchang University, 2024.

[25] 张会英,安亮,刘嘉欣,等.不同地貌单元兰州黄土物理力学特性分析[J].甘肃科技,2025,41(6): 32-37.
Zhang Huiying, An Liang, Liu Jiaxin, et al. Physical and mechanical properties of loess in different geomorphological units in Lanzhou [J]. Gansu Science and Technology, 2025,41(6): 32-37.

[26] Gan J K M, Fredlund D G, Rahardjo H. Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988,25(3): 500-510.

[27] 张晨阳,杨伟,汪零,等.基于REE示踪对红壤细沟间侵蚀团聚体周转和泥沙迁移特征的研究[J].土壤学报,2024,61(6): 1492-1505.
Zhang Chenyang, Yang Wei, Wang Ling, et al. Characteristics of aggregate turnover and sediment transport by interrill erosion using rare earth elements in red soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2024,61(6): 1492-1505.

[28] 芮孝芳.产流模式的发现与发展[J].水利水电科技进展,2013,33(1): 1-6.
Rui Xiaofang. The discovery and development of runoff formation models [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013,33(1): 1-6.

[29] 乔林明,韩慧,贺高航,等.侵蚀地貌中土壤团聚体碳、氮、磷含量变化及其环境风险[J].水土保持学报,2022,36(3): 267-273.
Qiao Linming, Han Hui, He Gaohang, et al. Changes of C, N, P contents in soil aggregates and their environmental risk across eroded landforms [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(3): 267-273.

[30] Sidorchuk A. Dynamic and static models of gully erosion [J]. Catena, 1999,37(3/4): 401-414.