

# 黄土高原典型地区不同植被覆盖下坡面土壤侵蚀阈值研究

张龙齐<sup>1,2</sup>, 贾国栋<sup>1,2</sup>, 吕相融<sup>1,2</sup>, 雷自然<sup>1,2</sup>, 刘锐<sup>1,2</sup>, 张潇<sup>1,2</sup>

(1.北京林业大学国家林业和草原局水土保持重点实验室,北京 100083;

2.北京林业大学水土保持学院,首都圈森林生态系统国家定位观测研究站,北京 100083)

**摘要:** 为了分析植被覆盖对黄土高原坡面水土流失的影响,量化土壤侵蚀的植被覆盖阈值,基于模拟降雨数据分析了植被覆盖对土壤侵蚀的作用机制,利用绥德、西峰、天水等黄土高原高原典型地区的野外径流小区定位观测资料,探讨了不同覆被类型下植被覆盖控制径流和土壤侵蚀的有效性,确定了不同覆被类型下植被覆盖调控径流和防治土壤侵蚀的植被覆盖下限阈值和上限阈值。结果表明:(1)植被覆盖度的提高增加了土壤入渗、减少了径流量、延缓了径流流速、增加了土壤抵抗侵蚀的能力。(2)坡面径流量随植被覆盖度呈幂函数或指数函数下降,土壤侵蚀量随植被覆盖度呈指数函数、幂函数或者对数函数下降。(3)总体而言,不同地区植被控制土壤侵蚀的下限阈值在 20%~30%,上限阈值在 50%~70%。(4)土壤质地、植被类型、甚至植被的根系特征对植被控制径流和土壤侵蚀的效益有重要影响。研究结果为黄土高原水土保持工作提供研究依据。

**关键词:** 黄土高原; 土壤侵蚀; 植被覆盖; 阈值; 人工降雨

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)02-0187-12

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.02.022

## Research of Soil Erosion Thresholds on the Lower Slopes of Different Vegetation Cover in Typical Areas of Loess Plateau

ZHANG Longqi<sup>1,2</sup>, JIA Guodong<sup>1,2</sup>, LÜ Xiangrong<sup>1,2</sup>, LEI Ziran<sup>1,2</sup>, LIU Rui<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiao<sup>1,2</sup>

(1.Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Soil and Water

Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.The Metropolitan Area Forest Ecosystem

Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

**Abstract:** In order to analyze the influence of vegetation cover on soil and water loss on the Loess Plateau slope and quantify the threshold of vegetation cover of soil erosion, the mechanism of vegetation cover on soil erosion was analyzed based on simulated rainfall data, and the observation data of field runoff plots in typical areas of the Loess Plateau such as Suide, Xifeng and Tianshui were used. The effectiveness of vegetation cover in controlling runoff and soil erosion under different cover types was discussed, and the lower threshold and upper threshold of vegetation cover in regulating runoff and preventing soil erosion under different cover types were determined. The results showed that: (1) The increases of vegetation coverage increased soil infiltration, reduced runoff, delayed runoff velocity, and increased soil resistance to erosion. (2) Slope runoff decreased with vegetation coverage as a power function or exponential function, and soil erosion decreased with vegetation coverage as an exponential function, power function or a logarithmic function. (3) In general, the lower threshold and upper threshold of soil erosion control by vegetation in different regions were 20%~30% and 50%~70% respectively. (4) Soil texture, vegetation type and even root characteristics of vegetation had important effects on the benefits of vegetation in controlling runoff and soil erosion. The results provide a research basis for soil and water conservation on the Loess Plateau.

**Keywords:** Loess Plateau; soil erosion; vegetation cover; threshold value; artificial rainfall

收稿日期:2022-09-01

资助项目:国家重点研发计划项目“坝上高原及华北北部山地沙化土地治理与治沙产业技术研发及示范”(2016YFC0500802);国家自然科学基金面上项目“季节性干旱的树木水分利用适应机制研究”(41871152);国家自然科学基金项目“黄土区土壤—地表—地下水文多维耦合过程及植被调控机制”(U2243202)

第一作者:张龙齐(1998—),女,在读硕士研究生,主要从事森林生态水文研究。E-mail:zql255676314@163.com

通信作者:贾国栋(1986—),男,副教授,博士生导师,主要从事森林生态水文研究。E-mail:jgd3@163.com

黄土高原是全国甚至全世界水土侵蚀最严重的地区之一<sup>[1]</sup>,为了控制水土流失,国家从 20 世纪 50 年代开始就采取一系列措施进行治理<sup>[2]</sup>,其中增加植被覆盖在消减径流、防止水土流失方面起到重要作用<sup>[3]</sup>。

长期以来,植被覆盖一直被认识是减少水土流失、保护生态环境的有效策略<sup>[4-5]</sup>。先前的研究<sup>[6-8]</sup>表明,植被覆盖度增加可以有效地控制各种环境条件下的土壤侵蚀。然而,现有学者<sup>[9-11]</sup>普遍认为,半干旱区植被恢复对生态系统的影响并不总是积极的。长期大规模的植被恢复改变区域土壤水平衡<sup>[12]</sup>。植被恢复虽然促进降雨向优先流转化<sup>[13]</sup>,但蒸散和植被生长加剧土壤耗水<sup>[14]</sup>,导致土壤水分枯竭,甚至土地退化<sup>[1]</sup>。与此同时,长期大规模的植被恢复通过减少地表径流和侵蚀<sup>[15]</sup>,导致河流径流量降低<sup>[16]</sup>,进一步制约下游的可持续发展。植被覆盖度的提高增加土壤入渗,减少径流量,延缓径流流速<sup>[17]</sup>,增加土壤抵抗侵蚀的能力。但增加相同覆盖度,上述作用效果的增量不同,同时植被覆盖度提高对调控径流和防止土壤侵蚀的效益不同<sup>[18]</sup>。因此,评估植被控制径流和土壤侵蚀的有效性,权衡植被控制径流和土壤侵蚀的关系,确定适宜的植被恢复覆盖对植被恢复策略的选择至关重要。

目前,判别植被是否达到下限阈值的方法以图形识别为主<sup>[19]</sup>,没有明确的标准;判别植被是否达到上限阈值的方法将植被覆盖下的土壤流失与容许的土壤流失量进行比较<sup>[20]</sup>,当植被保护土壤并将土壤流失减少到容许值的植被数量被认为植被覆盖阈值<sup>[21]</sup>。这种方法是基于多年平均土壤流失量,然而有研究<sup>[22]</sup>表明,大部分的侵蚀量通常是由少数几次大雨或者暴雨引起的侵蚀事件造成的,在侵蚀严重的黄土高原更是如此。考虑到少数几个大的侵蚀事件控制着土壤侵蚀总量,有效的水土保持策略应以这些大的侵蚀事件为基础。孙一等<sup>[23]</sup>构建产沙指数[易侵蚀区单位降雨有效降雨在单位面积上的产沙量, $t/(km^2 \cdot mm)$ ],基于黄土高原土壤容许土壤流失量与日降雨量 $>25 mm$ 的多年平均雨量的比值,将判别标准中的多年平均土壤流失量转化为次降雨下的产沙指数。但这种方法均从土壤侵蚀角度出发,缺乏植被恢复对控制径流和土壤侵蚀的关系的权衡。

基于此,本文以黄土高原典型坡面水蚀过程为研究对象,利用人工模拟降雨试验和径流小区定位观测相结合的方法,分析植被覆盖对坡面土壤侵蚀的影响,量化土壤侵蚀的植被覆盖阈值,研究结果为土壤侵蚀防控提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黄土高原地处我国西北部,属于旱和半干旱气候

区<sup>[24]</sup>。黄土高原降雨主要发生在 6—9 月,降雨具有历时短、强度大等特点,并且由于地势复杂,土质疏松,极易发生土壤侵蚀。黄土高原土壤颗粒组成为粉粒(0.05~0.001 mm)含量高,大部分土壤含量为 60%~75%,不同区域间变幅较小。其中 0.05~0.01 mm 粗粉粒占 50%左右。地带性表现为黄土粒径自西北向东南逐渐变细,可以划分为 4 个土壤质地带,分别为沙壤带、轻壤带、中壤带和重壤带,这一特点以砂粒和黏粒的变化最为明显。本文所选研究区绥德属于沙壤带,安塞属于轻壤带,长武、天水 and 西峰属于中壤带,杨凌属于重壤带。土壤质地采用国际分类标准,绥德属于砂质壤土,安塞属于壤质黏壤土,长武、天水、西峰属于黏壤土,杨凌属于壤质黏土。

### 1.2 试验设计

1.2.1 室内模拟降雨试验设计 模拟降雨试验主要用于分析植被覆盖对土壤侵蚀的作用机制,试验分别在 2016 年、2017 年、2019 年的 6—8 月进行。以天水的黏壤土为研究对象,分析植被覆盖度对土壤侵蚀的作用机制;以绥德的砂质壤土、安塞的砂质黏壤土、长武的黏壤土、杨凌的壤质黏土为研究对象,分析不同土壤质地下植被覆盖的阈值。在室内模拟不同质地类型土壤(绥德的砂质壤土、安塞的砂质黏壤土、长武的黏壤土、杨凌的壤质黏土)(表 1)、不同植被覆盖下的坡面产流和产沙过程,研究不同植被覆盖对坡面土壤侵蚀过程的影响。试验在中国科学院水利部水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工降雨大厅进行,土槽规格为 5 m×1 m×0.5 m(长×宽×高),坡度大小可调节,范围为 0~40°。试验降雨方式为下喷式降雨系统,降雨高度为 18 m,保证雨滴落速均能达到最终速度。试验前将土样自然风干,采用过筛法除去杂草和石块,筛的孔径大小为 1 cm。常常采用土槽底部铺沙法保证试验土槽中土壤的透水状况与天然坡面接近,铺沙厚度一般为 10 cm。土槽填土采用分层压实法,土层间隔为 5 cm,压实容重与野外实测容重保持一致,总填土厚度为 30 cm。为使最终降雨量相等,相应降雨历时分别为 60,45 min。

1.2.2 野外人工模拟降雨试验 小区布设在水土保持试验站内,为自然荒地,坡度约 15 m,海拔约 1 500 m,采用大理石板围建不同坡面长度的径流小区,在小区下方槽口处设置 PVC 接口,用来收集径流和泥沙。研究采用的降雨装置采用 QYJY-501 人工模拟降雨系统设备<sup>[25-26]</sup>。模拟降雨采用喷嘴组合获得不同的降雨强度,与自然降雨有 80%以上的相似性。用密封袋依次采集不同深度土壤颗粒样品土样,采用激光粒度仪对颗粒粒径组成进行分析。土壤容重采用环刀法,对采集点土壤进行取样,烘干、称量

后获得的土壤容重、孔隙度(表 2)。室内试验法获取土壤田间持水量,浸水饱和法测定土壤饱和含水量,用 SW080B 土壤张力入渗仪获取不同土层深度饱和导水率。采用网格法获取不同径流小区覆盖度数据,采用样方法获取径流小区植被生物量、最大截留量数据。在草被生长过程中,通过适度的修剪,使其尽可能满足设计的覆盖的要求,并在试验开始前进行确

表 1 土壤基本性质

采样点	质地分类	各粒组土粒含量/%			>0.25 mm 水稳定 团聚体百分比/%	有机质含量/ (g · kg <sup>-1</sup> )	MWD/mm
		<0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~2 mm			
绥德	砂质壤土(SL)	12.1	19.4	68.5	6.6	5.9	0.04
安塞	砂质黏壤土(LL)	15.7	26.8	57.5	20.7	7.4	0.11
长武	黏壤土(ML)	21.2	38.0	40.8	51.8	12.3	0.28
杨凌	壤质黏土(HL)	26.3	38.1	35.6	76.4	18.3	0.36

表 2 径流小区基本特征

草被 覆盖/%	小区坡面草被情况	孔隙比	容重/ (g · cm <sup>-3</sup> )
0		0.88	1.42
30	龙须草、小冠花混杂生长,龙须草约占 70%。通过坡面 5 个断面 10 个 20 cm×20 cm 样方调查,龙须草平均株高约 12.5 cm,须根长约 14.6 cm;小冠花平均株数为 3 株,平均株高约 20.3 cm,主根长约 72.5 cm	0.97	1.37
60	龙须草、小冠花混杂生长,龙须草约占 65%。通过坡面 5 个断面 10 个 20 cm×20 cm 样方调查,龙须草平均株高约 12.2 cm,须根长约 13.4 cm;小冠花平均株数为 7 株,平均株高约 21.5 cm,主根长约 65.5 cm	1.03	1.34
90	龙须草、小冠花混杂生长,龙须草约占 75%通过坡面 5 个断面 10 个 20 cm×20 cm 样方调查,龙须草平均株高约 12.8cm,须根长约 15.3 cm;小冠花平均株数为 8 株,平均株高约 19.6 cm,主根长约 75.5 cm	1.05	1.31

1.2.3 径流泥沙数据 测量小区表层土壤体积含水率,保证土壤体积含水率相对一致。雨强率定后开始试验。每次试验中,记录初始产流时间,产流后收集径流泥沙样,取样间隔为 2 min,总历时为 60 min。记录染料(KMnO<sub>4</sub>)在水流中通过一定长度(0.5 m)的时间,计算水流速度。染色法只能测量最大表面速度,而不能测量平均速度。试验使用 Chen 等<sup>[21]</sup>的方法,获得平均水流速度。试验结束后采用称重—沉淀—晾晒—称重和取样—烘干—称量—校正的方法,分别获得产流量和产沙量。

### 1.3 数据处理

采用 SPSS 19.0 软件进行数据处理和统计分析,采用 Origin 2021 软件绘图所有数据。采用 Pearson (皮尔逊)检验进行各因素之间相关性分析。在所有情况下,若  $p < 0.05$  则认为具有显著相关关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 植被覆盖对坡面土壤侵蚀的作用机制

2.1.1 植被覆盖对坡面水沙关系的影响 不同草被覆盖下土壤入渗速率变化规律见图 1。土壤入渗率随降雨历时的增加而降低,并逐渐趋于稳定。草被覆盖使土壤入渗速率快速下降的速率变缓,同时延长入渗速率快速下降阶段的时间。坡面入渗量随草被覆盖的增加而增加,相同草被覆盖度增量中,由 30%

认。BTC 微根管根系生态监测系统获取径流小区植被根系数据。Jia 等<sup>[27]</sup>的研究结果表明,>100 cm 深度的土壤受到降雨的影响较小。因此,本研究利用土壤剖面水分分析仪(EM50)检测土壤水分。该仪器同时使用 5 个土壤水分传感器记录 20,40,60,80,100 cm 深处的土壤体积含水量。土壤水分观测点位于裸露坡面、60%草坡的上、中、下 3 个位置。

草被覆盖增加至 60%草被覆盖引起的土壤入渗增量最大。

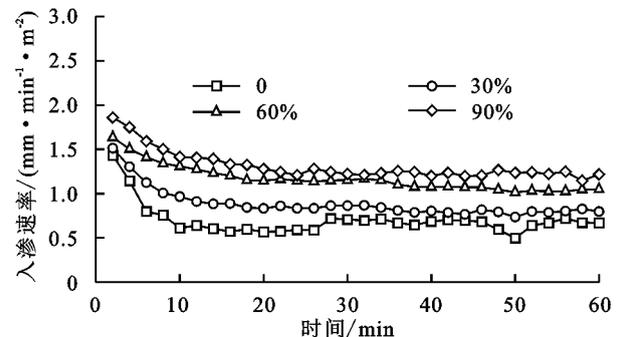


图 1 草被覆盖对土壤入渗率的影响

总体来看,随着草被覆盖度的增加,坡面径流速率快速增加阶段和缓慢增加阶段持续的时间逐渐延长,草被覆盖度越大效果越明显(图 2)。裸露坡面的平均径流速率为 1.22 mm/(min · m<sup>2</sup>),30%,60%和 90%草被覆盖的减流效益分别为 15.4%,38.4%和 50.3%,表明草被覆盖度越大,增加入渗减少径流的效果越显著。

不同草被覆盖下土壤侵蚀速率变化规律见图 3。土壤侵蚀速率随降雨历时的增加先快速增加后逐渐趋于稳定。随着草被覆盖度的增加,坡面侵蚀速率快速增加阶段持续的时间逐渐缩短,草被覆盖度越大效果越明显。裸露坡面的平均累积的产沙量为 142.98

kg, 30%, 60% 和 90% 草被覆盖坡面的减沙效益分别为 16.5%, 89.5% 和 96.1%, 草被覆盖度越大, 防止土壤侵蚀的效果越显著。

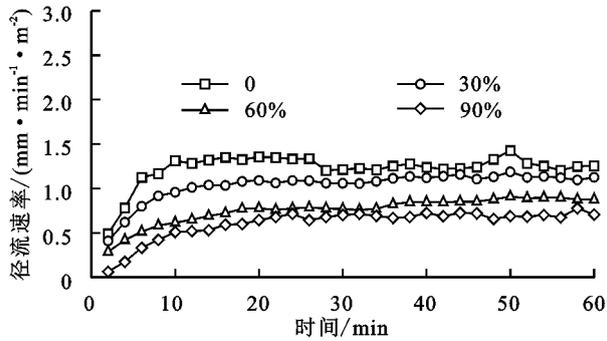


图 2 草被覆盖对径流过程的影响

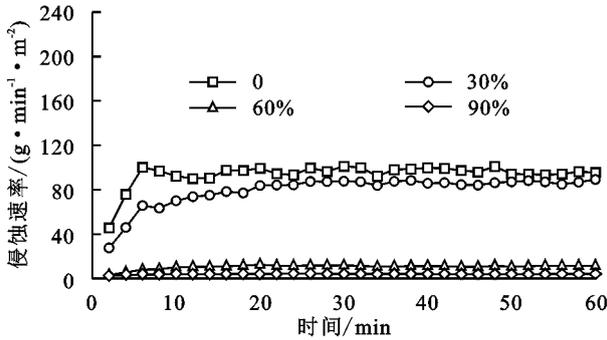


图 3 草被覆盖度对侵蚀产沙过程的影响

2.1.2 植被覆盖对坡面侵蚀动力参数的影响 从图 4 可以看出, 随降雨历时的增加平均流速呈现缓慢增加的变化过程; 随着草被覆盖的增加, 平均流速逐渐降低。与裸坡上的径流流速相比, 30%, 60% 和 90% 草被覆盖下径流流速依次降低 21.3%, 34.9% 和 92.3%。草被冠层对径流的拦阻是径流流速降低的主要原因, 同时草被冠层对径流的拦阻使得径流深较深, 进一步降低径流流速。径流剪切力变化规律见图 5。0 和 30% 草被覆盖下, 径流剪切力随降雨历时的增加缓慢下降, 60% 和 90% 草被覆盖下, 径流剪切力随降雨历时的增加缓慢增加。随着草被覆盖的增加, 平均剪切力逐渐增加。30%, 60% 和 90% 草被覆盖下径流剪切力分别是裸坡上径流剪切力的 1.15, 1.53, 2.32 倍。

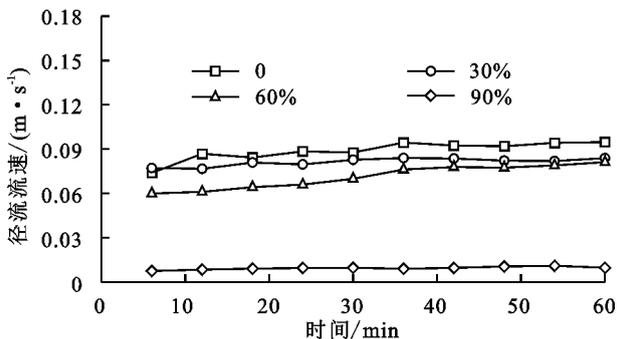


图 4 植被覆盖对径流流速的影响

径流剪切力与侵蚀速率密切相关。拟合二者的关系(表 3)可以发现, 不同草被覆盖与降雨强度条件下径流剪切力与侵蚀速率具有很好的线性关系, 随径流剪切

力的增加, 侵蚀速率逐渐增大。根据 WEPP 模型, 径流剪切力与侵蚀速率线性拟合的斜率为细沟的可蚀性, 而拟合直线在  $x$  轴上的截距为土壤临界剪切力, 它是表征土壤抵抗径流侵蚀的阻力参数, 本试验中随草被覆盖的增加, 细沟可蚀性分别为 29.462, 24.478, 8.601, 1.245 s/m, 细沟可蚀性依次降低 16.9%, 70.8%, 95.8%; 而土壤临界剪切力分别为 0.51, 0.76, 0.77, 3.63 N/m<sup>2</sup>, 土壤临界剪切力依次增加 0.49, 0.51, 6.12 倍。

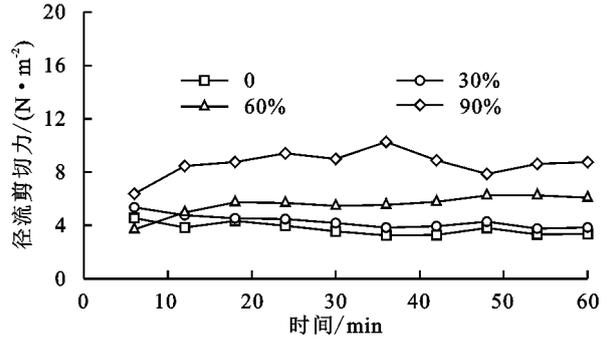


图 5 植被覆盖对径流剪切力的影响

表 3 不同草被覆盖径流剪切力与侵蚀速率的关系

草被覆盖/%	拟合方程	临界径流剪切力/ (N·m <sup>-2</sup> )	R <sup>2</sup>	n
裸坡	$y=29.462x-14.895$	0.51	0.75	150
30	$y=24.478x-18.688$	0.76	0.55	150
60	$y=8.6007x-6.6565$	0.77	0.80	150
90	$y=1.245x-4.5158$	3.63	0.56	150

不同草被覆盖下径流功率变化见图 6。平均径流功率为 0.199 kg/s<sup>3</sup>。不同草被覆盖下, 径流功率随降雨历时的增加均呈现缓慢增加的变化趋势。随着草被覆盖的增加, 平均功率逐渐降低。30%, 60% 和 90% 草被覆盖下径流功率是裸坡上的径流功率的 0.87, 0.49, 0.26 倍。

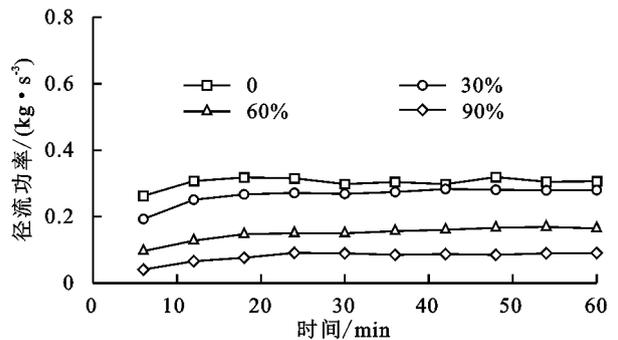


图 6 植被覆盖对径流功率的影响

径流功率考虑径流深度、径流流速和坡面坡度, 与径流剪切力相比涵盖更多的径流动力特性。拟合径流功率和侵蚀速率的关系见表 4。不同草被覆盖与降雨强度条件下径流功率与侵蚀速率具有很好的线性相关关系, 随径流功率的增加, 侵蚀速率逐渐增大。拟合直线在  $x$  轴上的截距为土壤临界径流功率, 是表征土壤抵抗径流侵蚀的阻力参数, 本试验中

随草被覆盖的增加,临界径流功率分别为 0.02,0.03,0.05,0.05 N/(m·s),临界径流功率依次增加 0.50,1.50,1.50 倍。

表 4 不同草被覆盖下径流功率与侵蚀速率的关系

草被覆盖/%	拟合公式	临界径流功率/ (N·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	n
裸坡	y=301.41x-4.6037	0.02	0.64	150
30	y=291.05x-8.9669	0.03	0.59	150
60	y=69.38x-3.6889	0.05	0.82	150
90	y=30.50x-1.4449	0.05	0.79	150

## 2.2 坡面土壤侵蚀的植被覆盖阈值的划分

郑明国等<sup>[28]</sup>评估极端降雨条件下水土保持治理的减沙效益中发现,“2017.07.26”榆林大暴雨事件中,坡面总的减沙效益为 55.1%;肖培青等<sup>[29]</sup>的研究表明,西柳沟在“2016.08.17”大暴雨中,林草植被措施减沙效益达到 84.2%。总体来看,坡面植被减沙的效益在 50%~90% 范围内波动。同时,潼关站来沙控制在 2.5 亿 t/a 或 3 亿 t/a<sup>[30]</sup>左右可实现黄河下游的冲淤平衡,相较于 1919—1959 年黄河下游总的泥沙量(16 亿 t),冲淤平衡的泥沙量减少 81.3%~84.4%。因此,本研究以次降雨的减流效益、减沙效益及减流效益与减沙效益的比值为评价指标,从偏安全的考虑,以平均减沙效益的 50%和 90%为划分植被覆盖度对侵蚀影响下限阈值和上限阈值的分界点,以减流效益与减沙效益的比值确定兼顾径流和侵蚀的植被覆盖阈值。减流效益、减沙效益及减流效益与减沙效益的比值的计算公式为:

$$\text{RRE} = \frac{R_c - R_v}{R_c} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{SRE} = \frac{S_c - S_v}{S_c} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{RRSR} = \frac{\text{RRE}}{\text{SRE}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $R_c$ 、 $R_v$  分别为裸坡和植被覆盖小区的径流深(m); $S_c$ 、 $S_v$  分别为裸坡和植被覆盖小区的侵蚀量,(t/km<sup>2</sup>)。

坡长对侵蚀有重要影响。本研究中,不同观测小区的坡长不同。为了使结果具有可比性,采用江忠善等<sup>[31]</sup>提出的方程将计算出的不同坡长小区土壤侵蚀模数修改为标准坡长 22.13 mm,计算公式为:

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (4)$$

式中: $L$  为标准化到 22.13 m 坡长上的侵蚀量(t/km<sup>2</sup>); $m$  为坡长因子指数, $m$  值为 0.28。

坡度对土壤侵蚀的影响较大。本研究中,不同观测小区的坡度不同。为了使结果具有可比性,将计算出的不同植被覆盖小区土壤侵蚀模数修改为裸地坡

度,计算公式为:

$$SM_{\text{mod}} = \frac{21.91 \sin \theta_0 - 0.96}{21.91 \sin \theta_i - 0.96} \times SM_i \quad (5)$$

式中: $SM_{\text{mod}}$  为对裸地坡度的修正土壤侵蚀模数(t/km<sup>2</sup>); $SM_i$  为观测不同植被覆盖小区的土壤侵蚀模数(t/km<sup>2</sup>); $\theta_0$  为裸地坡度(°); $\theta_i$  为不同植被覆盖小区的坡度(°)。

## 2.3 不同土壤类型下植被覆盖的阈值

### 2.3.1 林地坡面土壤侵蚀的植被覆盖阈值

从图 7 可以看出,不同地区径流和侵蚀量随林地覆盖度的增加不断下降。回归分析发现,绥德、西峰和天水地区径流随林地覆盖度依次呈幂函数、指数函数和线性下降,表达式分别为  $y = 29.11x^{-0.566}$ ,  $R^2 = 0.63$ ;  $y = 1.1672e^{-0.015x}$ ,  $R^2 = 0.98$ ;  $y = -0.0727x + 7.1155$ ,  $R^2 = 0.95$ ;侵蚀量随植被覆盖度具有相同的函数关系,表达式分别为  $y = 40484x^{-1.159}$ ,  $R^2 = 0.91$ ;  $y = 633.78e^{-0.069x}$ ,  $R^2 = 0.99$ ;  $y = -1.2831x + 138.39$ ,  $R^2 = 0.91$ 。以减沙效益的 50%和 90%为分界点,划分植被覆盖度对侵蚀影响的阈值。绥德、西峰、天水 3 个地区林地覆盖的上限阈值分别为 60%~70%,30%~40%,70%~80%;由于数据的不完整性,本文仅获得绥德地区的林地覆盖的下限阈值为 10%~20%,从图 7 可以发现,西峰地区的林地覆盖的下限阈值 < 30%,而天水地区的下限阈值 < 50%。

相同植被覆盖条件下,土壤侵蚀量呈现绥德 > 天水 > 西峰的关系。以 3 个地区共同覆盖范围(50%~90%)为比较对象,发现天水、西峰、绥德的减沙效益平均值分别为 90.2%,99.1%,90.2%,绥德和西峰地区牧草覆盖的减沙效益是天水地区的 1.00,1.10 倍。

相同植被覆盖条件下,坡面径流与侵蚀量的关系一致。在 50%~90% 覆盖范围内,天水、西峰、绥德的减流效益平均值分别为 77.0%,94.8%,82.6%,绥德和西峰地区牧草覆盖的减流效益分别是天水地区的 1.07,1.23 倍。不同地区相同林地覆盖对减少侵蚀与径流的影响存在差异。以兼顾径流与侵蚀确定林地覆盖阈值,绥德的上限阈值为 60%~70%,径流与侵蚀同等兼顾;西峰的上限阈值为 30%~50%,以兼顾径流为主;天水的上限阈值为 50%~70%,以兼顾侵蚀为主。

### 2.3.2 牧草坡面土壤侵蚀的植被覆盖阈值

从图 8 可以看出,不同地区径流和侵蚀量随牧草覆盖度的增加不断下降。回归分析发现,绥德、西峰和天水地区径流随植被覆盖度依次呈幂函数、指数函数和指数函数下降,表达式分别为  $y = 63.125x^{-0.769}$ ,  $R^2 = 0.97$ ;  $y = 14.316e^{-0.074x}$ ,  $R^2 = 0.99$ ;  $y = 7.7292e^{-0.02x}$ ,  $R^2 = 0.96$ ;侵蚀量与植被覆盖度依次呈对数函数、指数函

数、指数函数关系,表达式分别为  $y = -1038\ln(x) + 4720.5, R^2 = 0.98$ ;  $y = 2874.9e^{-0.117x}, R^2 = 0.94$ ;  $y = 852.25e^{-0.045x}, R^2 = 0.88$ 。

以减沙效益的 50% 和 90% 为分界点,划分牧草

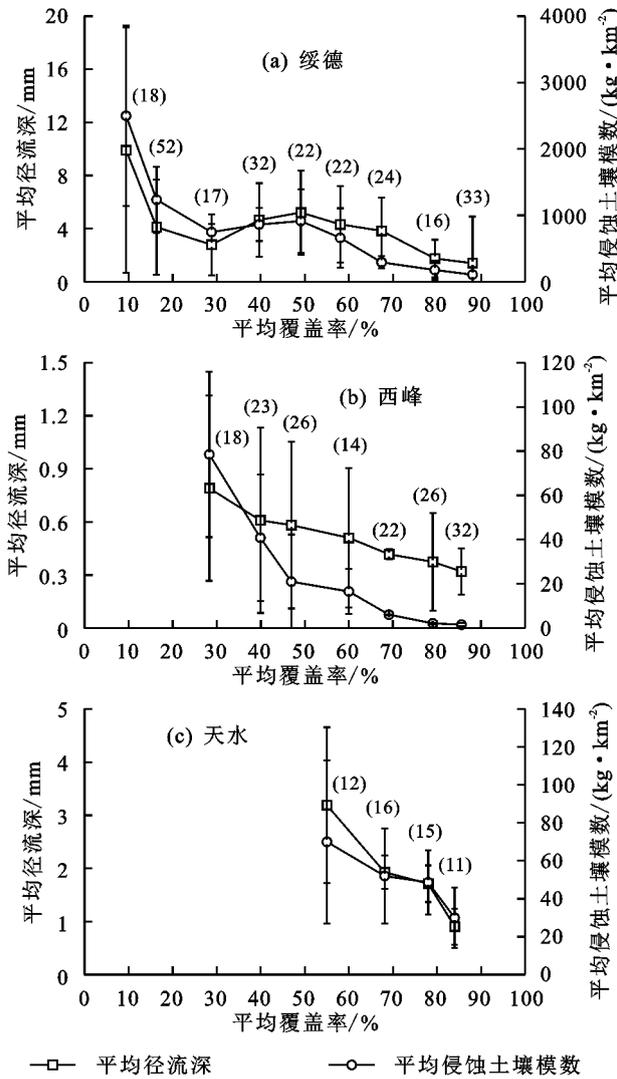
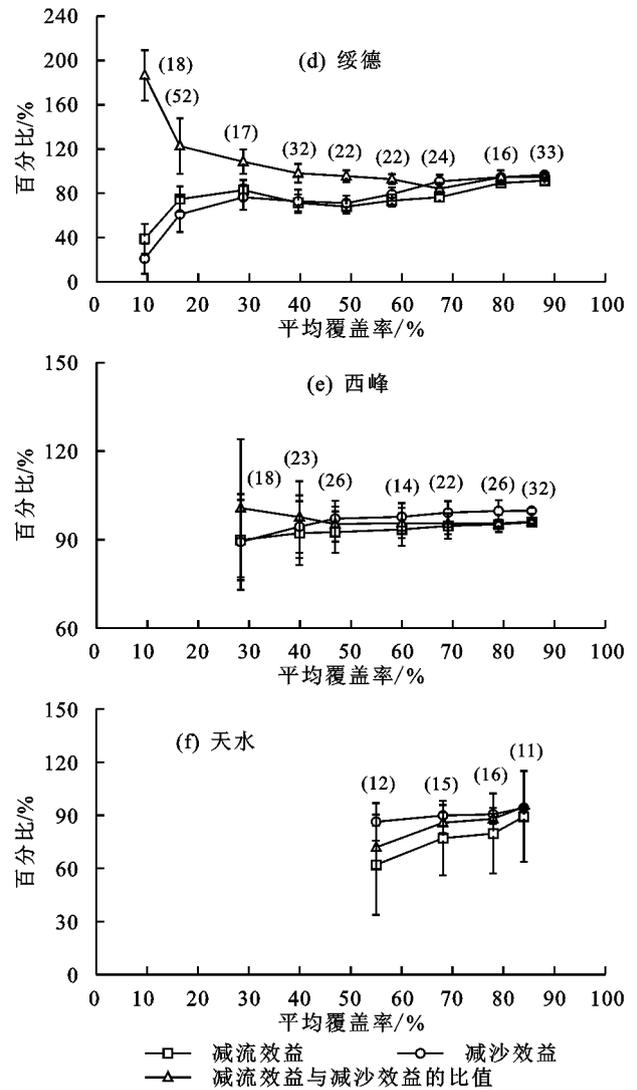


图 7 不同地区林地坡面侵蚀和控制效益随覆盖度的变化

相同牧草覆盖条件下,土壤侵蚀量存在绥德>天水>西峰的关系。以 3 个地区共同覆盖范围(0~80%)为比较对象,天水、西峰、绥德的减沙效益平均值分别为 62.6%,80.0%,67.0%,绥德和西峰地区牧草覆盖的减沙效益分别是天水地区的 1.07,1.28 倍;坡面径流与侵蚀量的关系一致。在 0~80%覆盖范围内,天水、西峰、绥德的减流效益平均值分别为 55.4%,78.5%,69.1%,绥德和西峰地区牧草覆盖的减流效益分别是天水地区的 1.24,1.25 倍。

不同地区相同牧草覆盖对减少侵蚀与径流的影响存在差异。以兼顾径流与侵蚀确定牧草覆盖阈值,天水的下限阈值为 10%~20%,上限阈值为 50%~70%,其中上限阈值径流与侵蚀同等兼顾;西峰的下限阈值为 10%~20%,上限阈值为 40%~60%较为适宜,其中上限阈值径流与侵蚀同等兼

覆盖度对侵蚀影响的阈值。绥德、西峰、天水三地区牧草覆盖的上限阈值分别为 60%~70%,40%~50%,60%~70%;下限阈值依次为 20%~30%,10%~20%,20%~30%。



顾;绥德的牧草植被覆盖的下限阈值为 20%~30%,上限阈值为 60%~80%,其中上限阈值径流与侵蚀同等兼顾。

2.3.3 荒坡坡面土壤侵蚀的植被覆盖阈值 从图 9 可以看出,不同地区径流和侵蚀量随荒坡覆盖度的增加不断下降。回归分析发现,绥德、西峰地区径流随植被覆盖度依次呈幂函数和指数函数下降,表达式分别为  $y = 36.189x^{-0.538}, R^2 = 0.97$ ;  $y = 9.2184e^{-0.039x}, R^2 = 0.95$ ;侵蚀量与植被覆盖度依次呈指数函数、指数函数关系,表达式分别为  $y = 3063.7e^{-0.037x}, R^2 = 0.99$ ;  $y = 1197.7e^{-0.069x}, R^2 = 0.90$ 。以减沙效益的 50% 和 90% 为分界点,划分荒坡杂草覆盖度对侵蚀影响的阈值。绥德、西峰荒坡杂草覆盖的上限阈值分别为 60%~70%,40%~50%;下限阈值依次为 10%~20%,20%~30%。

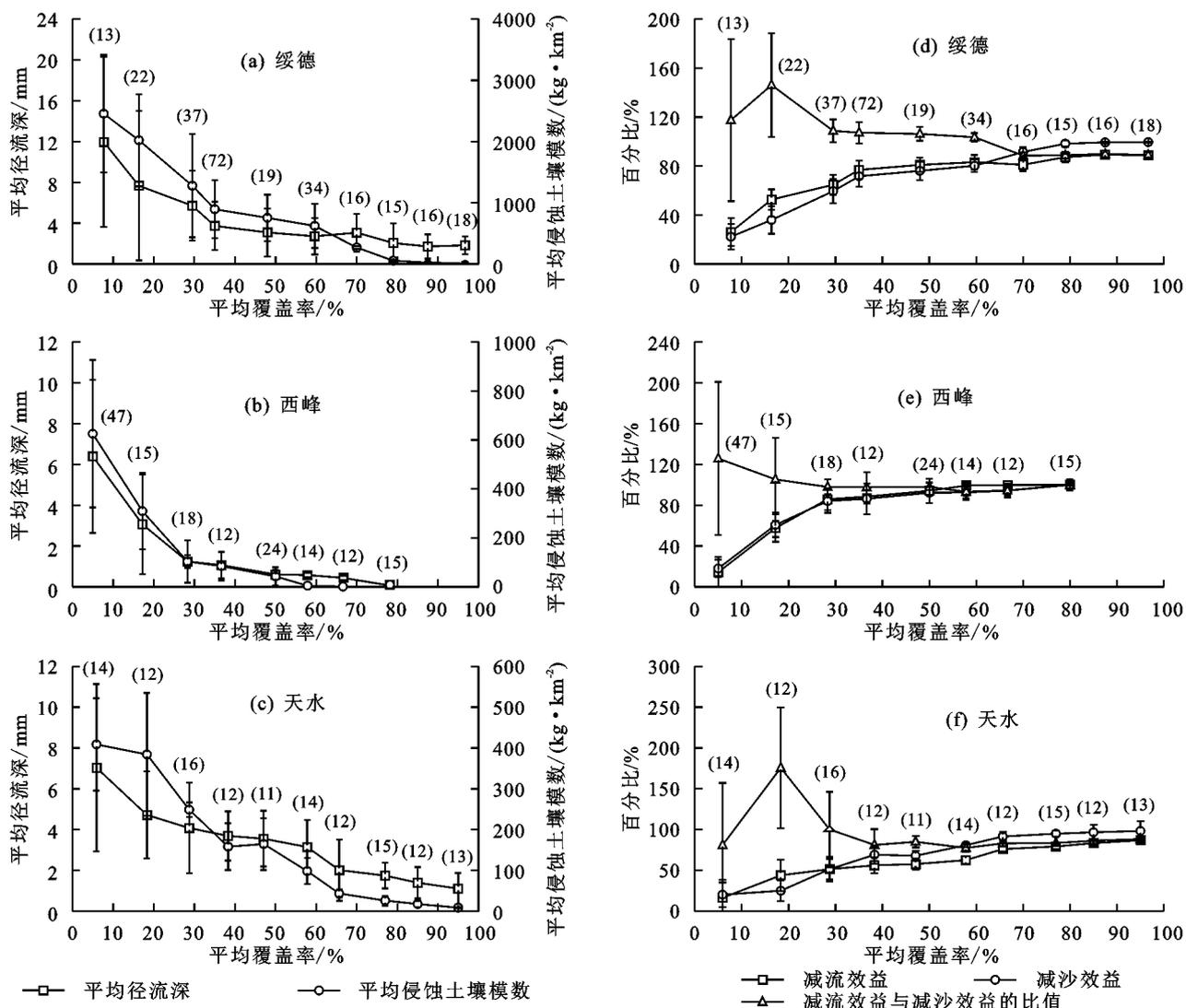


图 8 不同地区牧草坡面侵蚀和控制效益随覆盖度的变化

相同植被覆盖条件下,以 2 个地区共同覆盖范围 (0~70%)为比较对象,西峰、绥德的减沙效益平均值分别为 70.6%,67.9%,这表明西峰地区荒坡覆盖对侵蚀减少的影响最大,其次是绥德地区;坡面径流深与侵蚀量的关系一致。在 0~70%覆盖范围内,西峰、绥德的减流效益平均值分别为 66.5%,59.9%。不同地区相同荒坡覆盖对减少侵蚀与径流的影响存在差异。以兼顾径流与侵蚀确定荒坡覆盖阈值,西峰的下限阈值为 20%~30%,上限阈值为 40%~50%,其中上限阈值径流与侵蚀同等兼顾;绥德的植被覆盖的下限阈值为 20%~30%,上限阈值为 50%~70%,其中上限阈值以兼顾径流为主。

2.4 覆被类型对植被覆盖阈值的影响

2.4.1 绥德地区土壤侵蚀的植被覆盖阈值 绥德地区不同覆被类型坡面的侵蚀模数和减沙效益见表 5。不同覆被类型的减沙效益随覆盖的变化而变化。其中,0~10%覆盖范围内,荒坡地减沙效益最好,牧草地减沙效益最差,荒坡地减沙效益是牧草地的 1.25 倍;10%~40%覆盖范围内,林地减沙效益最好,牧草

地减沙效益最差,林地平均减沙效益是牧草地的 1.44 倍;当植被覆盖>40%时,荒坡覆盖和牧草的减沙效益较好,林地的减沙效益最弱。

结合表 6 分析,绥德地区林地的下限阈值为 10%~20%,上限阈值为 60%~70%,其中上限阈值径流与侵蚀同等兼顾;牧草植被覆盖的下限阈值为 20%~30%,上限阈值为 60%~80%,其中上限阈值径流与侵蚀同等兼顾。绥德荒坡的植被覆盖的下限阈值为 20%~30%,上限阈值为 50%~70%,其中上限阈值以兼顾径流为主。结合上段的分析,绥德地区在下限阈值附近防治土壤侵蚀的最佳植被以林地为主,在上限阈值附近防治土壤侵蚀的最佳植被以荒坡覆盖和牧草覆盖为主。

2.4.2 西峰地区土壤侵蚀的植被覆盖阈值 由表 7 可知,不同覆被类型的减沙效益随覆盖的变化而变化。其中,20%~50%覆盖范围内,林地减沙效益最好,荒坡地减沙效益最差,林地减沙效益是荒坡地的 1.13 倍;当植被覆盖>50%时,荒坡覆盖和牧草的减沙效益较好,林地的减沙效益最弱。

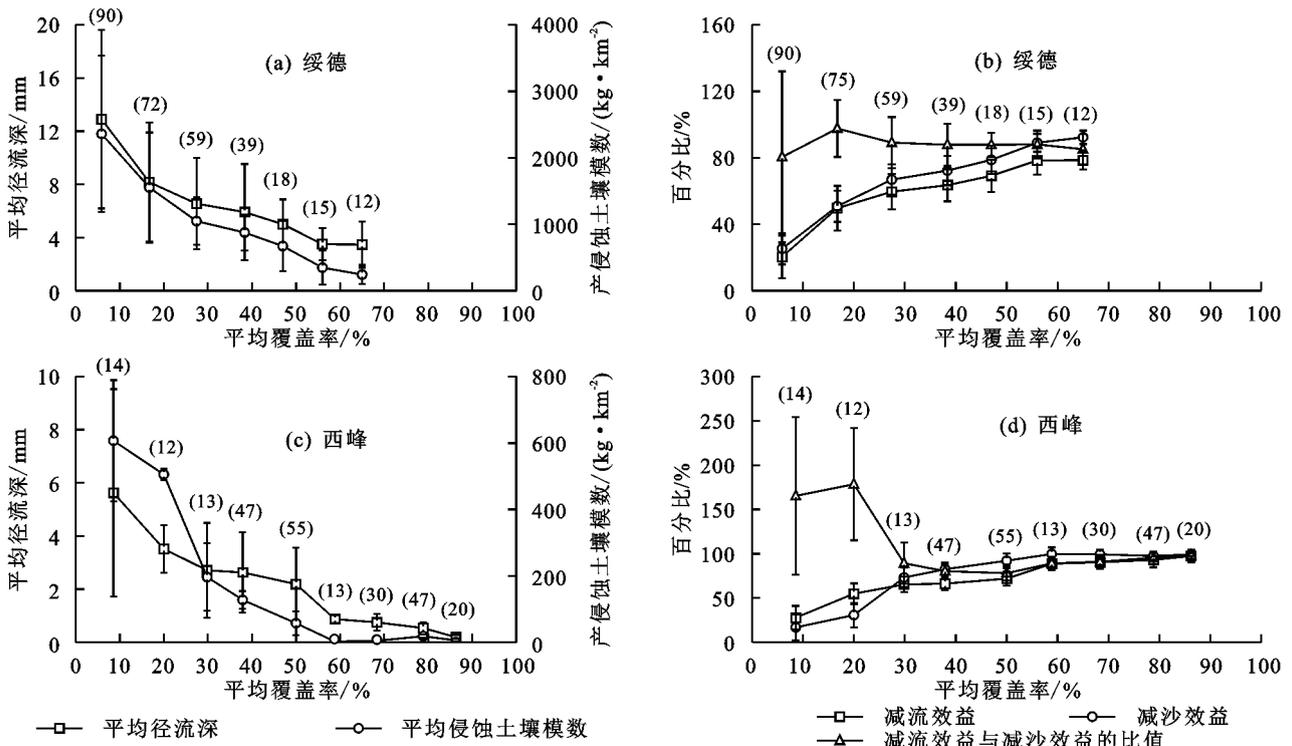


图 9 不同地区荒坡坡面侵蚀和控制效益随覆盖度的变化

表 5 绥德地区不同覆被类型下坡面侵蚀量及减沙效益

覆盖等级/%	平均侵蚀量/(t·km <sup>-2</sup> )			减沙效益/%		
	林地	牧草	荒地	林地	牧草	荒地
0~10	2500.2	2455.5	2359.8	20.8	20.2	25.3
10~20	1234.8	2021.3	1552.9	60.9	25.0	50.8
20~30	746.6	1278.5	1046.8	66.4	51.4	66.9
30~40	860.8	894.6	874.6	72.7	69.1	72.3
40~50	914.1	752.8	671.3	75.1	67.9	78.7
50~60	658.9	621.3	346.0	79.1	80.8	89.0
60~70	291.6	267.8	242.5	90.8	91.5	92.3
70~80	175.5	53.1		94.4	94.9	
80~90	105.6	20.0		96.7	96.6	
90~100		12.3			98.3	

西峰地区的林地覆盖的下限阈值为<30%，上限阈值为30%~50%，其中上限阈值以兼顾径流为主；牧

表 6 绥德地区不同覆被类型下减流效益与减沙效益的关系

覆盖等级/%	平均水深/mm			减流效益/%			减流效益/减沙效益/%		
	林地	牧草	荒地	林地	牧草	荒地	林地	牧草	荒地
0~10	9.9	12.0	12.9	38.8	26.1	20.3	186.4	117.5	80.5
20~30	4.1	7.7	8.2	74.7	52.6	49.6	122.6	146.2	97.6
20~30	2.8	5.7	6.5	82.8	64.8	59.6	108.5	108.8	89.1
30~40	4.6	3.7	5.9	71.3	76.9	63.5	98.0	107.3	87.8
40~50	5.2	3.1	5.0	67.8	81.0	69.1	95.5	106.3	87.8
50~60	4.3	2.7	3.5	73.4	83.2	78.4	92.7	103.6	88.0
60~70	3.8	3.1	3.5	76.4	81.1	78.6	84.1	88.6	85.1
70~80	1.7	2.1		89.2	87.3		94.5	88.8	
80~90	1.4	1.7		91.4	89.4		94.6	90.0	
90~100		1.8			88.7			89.0	

草的下限阈值为10%~20%，上限阈值为40%~60%较为适宜，其中上限阈值径流与侵蚀同等兼顾；荒坡的下限阈值为20%~30%，上限阈值为40%~50%，其中上限阈值径流与侵蚀同等兼顾。结合上段的分析，西峰地区在下限阈值附近防治土壤侵蚀的植被以林地最佳，其次是牧草，在上限阈值附近防治土壤侵蚀的最佳植被以牧草覆盖和荒坡覆盖为主(表8)。

2.4.3 天水地区土壤侵蚀的植被覆盖阈值 由表9可知，不同覆被类型的减沙效益随覆盖的变化而变化。以2种类型共同覆盖范围(50%~90%)为比较对象发现，50%~60%覆盖范围内，林地减沙效益较好，牧草地减沙效益较差，林地减沙效益是牧草地的1.07倍；当植被覆盖>60%时，牧草的减沙效益较好，林地的减沙效益最弱，牧草减沙效益是林地的1.03倍。

表 7 西峰地区不同覆被类型坡面侵蚀量及减沙效益

覆盖等级/%	平均侵蚀量/(t·km <sup>-2</sup> )			减沙效益/%		
	林地	牧草	荒地	林地	牧草	荒地
0~10		625.6	606.9		14.3	16.9
20~30		309.4	505.4		57.6	30.8
20~30	78.5	103.2	196.1	89.3	85.9	73.1
30~40	40.8	84.6	127.6	94.4	88.4	82.5
40~50	21.0	42.4	57.2	97.1	94.2	92.2
50~60	16.6	4.7	2.1	97.7	99.4	99.7
60~70	6.1	0.9	4.6	99.2	99.9	99.4
70~80	2.1	0.1	18.1	99.7	100.0	97.5
80~90	1.5		6.0	99.8		99.2
90~100						

结合表 10 分析,天水林地的下限阈值<50%,上限阈值 50%~70%,以兼顾侵蚀为主;牧草的下限阈值

表 8 西峰地区不同覆被类型下减流效益与减沙效益的关系

覆盖等级/%	平均水深/mm			减流效益/%			减流效益/减沙效益/%		
	林地	牧草	荒地	林地	牧草	荒地	林地	牧草	荒地
0~10		6.4	5.6		18.0	27.9		125.9	165.3
20~30		3.1	3.5		60.7	54.9		105.3	178.5
20~30	0.8	1.2	2.7	89.9	84.1	65.3	100.7	97.9	89.3
30~40	0.6	1.1	2.6	92.2	86.4	66.3	97.7	97.7	80.3
40~50	0.6	0.6	2.2	92.5	92.2	71.9	95.3	97.9	78.1
50~60	0.5	0.6	0.9	93.5	92.6	88.8	95.6	93.2	89.1
60~70	0.4	0.4	0.7	94.7	94.4	90.4	95.4	94.5	91.0
70~80	0.4	0	0.5	95.2	99.9	93.1	95.5	100.0	95.5
80~90	0.3		0.2	95.9		97.5	96.1		98.3
90~100									

表 9 天水地区不同覆被类型坡面侵蚀量及减沙效益

覆盖等级/%	平均侵蚀量/(t·km <sup>-2</sup> )		减沙效益/%	
	林地	牧草	林地	牧草
0~10		408.8		20.2
20~30		384.1		25.0
20~30		248.7		51.4
30~40		158.1		69.1
40~50		164.6		67.9
50~60	70.0	98.4	86.3	80.8
60~70	52.0	43.5	89.8	91.5
70~80	48.6	26.0	90.5	94.9
80~90	29.9	17.5	94.2	96.6
90~100		8.6		98.3

本研究发现,坡面径流量随植被覆盖度呈幂函数或指数函数下降,土壤侵蚀量随植被覆盖度呈指数函数、幂函数或者对数函数下降。Liu 等<sup>[35]</sup>研究认为,径流和侵蚀量随覆盖率呈线性或指数函数下降。植被通过被覆地表为防止水土流失提供关键的保护层<sup>[36]</sup>。植被对径流的影响主要表现为 2 个方面:首先是植被冠层及其枯落物对降雨的截留,显著减少降雨到达地表的量<sup>[37]</sup>;另一方面,植被恢复使得土壤容重降低,团聚体增加,孔隙度提高<sup>[38]</sup>,高根系密度促

进土壤空隙的联通性,改善土壤的入渗性能<sup>[39]</sup>。植被对侵蚀的影响主要表现在 3 个方面:一是植被覆盖降低降雨能量,从根本上减缓土壤侵蚀;二是植被覆盖增加地表粗糙度,降低径流侵蚀力;三是植被根系可以通过提高土壤有机质的数量来改善土壤性质,增加土壤稳定团聚体的数量和稳定性,进而增强土壤的抗蚀性;同时植被根系形成的地下网络将土壤颗粒结合在一起,增加了土壤的凝聚力和抗冲性。无论是植被冠层、枯落物及植被根系均与植被覆盖度具有密切的正相关关系,这解释了径流和土壤侵蚀随植被覆盖度变化的机理。

### 3 讨论

植被是坡面径流和土壤侵蚀的重要影响因素<sup>[32]</sup>,草被覆盖对入渗和径流的影响主要原因为:草被冠层对降雨的拦截避免雨滴对土壤的打击,防止土壤结皮的形成<sup>[33]</sup>,有利于土壤的下渗;同时草被覆盖增加地表粗糙度,延缓坡面径流的汇聚,降低径流流速,增加径流深度,从而增加坡面径流下渗的时间和下渗量;草被覆盖改善土壤结构状况,降低土壤容重,增加有机质含量和土壤孔隙度,从而显著提高土壤入渗能力<sup>[34]</sup>。

大量的研究<sup>[40-42]</sup>表明,植被覆盖与土壤侵蚀之间存在着阈值现象。本研究中,植被控制土壤侵蚀的下限阈值在 20%~30%,上限阈值在 50%~70%甚至 80%。就下限阈值而言,蒋定生等<sup>[43]</sup>以安塞等试验区的观测资料认为,牧草(沙打旺)的下限阈值达到 40%左右。本研究的下限阈值介于以上两者研究的中间。就上限阈值而言,蒋定生等<sup>[43]</sup>认为,牧草控制的侵蚀阈值在 60%~70%,研究结果与本文结果近似,本文的上限阈值结果相对偏小。分析原因认为:

一方面,本文的上限阈值不仅仅着眼于减少土壤侵蚀,同时考虑植被控制径流和土壤侵蚀的有效性;另一方面,本文考虑植被覆盖对土壤侵蚀的控制与植被类型和研究区的土壤质地密切相关,不同植被类型的冠层结构和根系特征不同,进而对径流和土壤侵蚀的控制产生差异。土壤质地不同,土壤剥离和搬运难易程度不同。当植被覆盖稀疏时,土壤侵蚀受植被类型和土壤质地的影响较大。因此,不同研究区植被控制土壤侵蚀的上限阈值差异相对较大。本研究发现,当植被覆盖度较大时,草被覆盖的减沙效益大于林地覆盖的减沙效益。分析原因认为,冠层对降雨不仅有截留和分散作用,同时还具有汇聚作用。当冠层截留的降雨超过叶片负荷时,雨滴从叶片脱落降至地面。相较于草本,林地相对高大,这部分降雨产生的能量更大,因此产生更多的侵蚀。当植被覆盖稀疏时,降雨多是直接降落至地表,这部分降雨影响较小或不存,随着植被覆盖度的增加,这部分降雨的影响逐渐增加。

表 10 天水地区不同覆被类型下减流效益与减沙效益的关系

覆盖等级/%	平均水深/mm		减流效益/%		减流效益/减沙效益/%	
	林地	牧草	林地	牧草	林地	牧草
0~10		7.0		16.3		81.0
20~30		4.7		43.9		175.6
20~30		4.1		51.5		100.1
30~40		3.7		56.1		81.2
40~50		3.6		57.7		85.0
50~60	3.2	3.1	62.0	62.6	71.8	77.4
60~70	1.9	2.0	77.1	76.0	85.8	83.1
70~80	1.7	1.7	79.6	79.3	88.0	83.5
80~90	0.9	1.4	89.3	83.4	94.8	86.3
90~100		1.1		86.8		88.3

植被垂直结构在单株尺度上对径流和土壤侵蚀起着关键作用。然而植被的多样性也与径流和土壤侵蚀密切相关<sup>[44]</sup>。本研究中绥德地区相同覆盖度等级下,牧草与荒坡坡面的减沙效益近似一致,牧草地的减流效益大于荒坡地。西峰地区相同覆盖度等级下,牧草地的减流效益与减沙效益均大于荒坡地。分析原因认为,绥德西峰的牧草主要为草木犀与紫花苜蓿,其茎高可达 30~100 cm,有一定的垂直结构,2 种牧草的根系特征为主根系统;2 个地区的杂草主要为马牙草、宾草、白草、白羊草、针茅草、蒿草、桥蒿草等,多无冠层结构,根系特征主要为须根。与杂草相比,牧草冠层的垂直结构增加对降雨的截留,主根系统更有利于土壤大孔隙的形成,促进下渗,这些均使得牧草的减流减沙效益大于杂草坡面。

## 4 结论

(1) 植被覆盖度的提高增加土壤入渗,减少径流

量,延缓径流流速,增加土壤抵抗侵蚀的能力。但增加相同覆盖度,上述作用效果的增量不同。

(2) 坡面径流量随植被覆盖度呈幂函数或指数函数下降,土壤侵蚀量随植被覆盖度呈指数函数、幂函数或者对数函数下降。

(3) 总体而言,不同地区植被控制土壤侵蚀的下限阈值为 20%~30%,上限阈值为 50%~70%。林地坡面,绥德、西峰、天水的上限阈值分别为 60%~70%,30%~50%,50%~70%。牧草坡面,绥德、西峰、天水的下限阈值分别为 20%~30%,10%~20%,10%~20%,上限阈值分别为 60%~80%,40%~60%,50%~70%。荒坡坡面,绥德、西峰的下限阈值分别为 20%~30%,20%~30%,上限阈值分别为 50%~70%,40%~50%。

(4) 土壤质地、植被类型、甚至植被的根系特征对植被控制径流和土壤侵蚀的效益有重要影响。绥德地区植被覆盖在 40%及以下时,林地可以较好地防治土壤侵蚀。当植被覆盖度>40%时,荒坡杂草和牧草可以较好地防止土壤侵蚀;西峰地区荒坡地可以较好地防止土壤侵蚀,其次是林地覆盖;天水地区防止土壤侵蚀和水土保持的植被选择可以林地和牧草兼顾。

## 参考文献:

- [1] Yu Y, Zhao W, Martinez-Murillo J F, et al. Loess Plateau, from degradation to restoration[J]. Science of the Total Environment, 2020, 738: e140206.
- [2] 孙若修,申明爽,胡亚伟,等.模拟降雨下坡面草带分布对产流产沙过程的影响[J].水土保持学报,2022,36(4): 22-29.
- [3] 黄鹏飞,陈晓安,郑太辉,等.红壤坡地不同植物措施消减径流峰值研究[J].水土保持学报,2016,30(1):79-82.
- [4] Wen Z, Lees B G, Jiao F, et al. Stratified vegetation cover index: A new way to assess vegetation impact on soil erosion[J]. Catena, 2010, 83(1): 87-93.
- [5] Hou J, Fu B J, Wang S, et al. Comprehensive analysis of relationship between vegetation attributes and soil erosion on hillslopes in the Loess Plateau of China[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(5): 1721-1731.
- [6] Tang C J, Liu Y, Li Z W, et al. Effectiveness of vegetation cover pattern on regulating soil erosion and runoff generation in red soil environment, southern China[J]. Ecological Indicators, 2021, 129: e107956.
- [7] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review[J]. Progress in Physical Geography, 2005, 29(2): 189-217.
- [8] Zhou P, Luukkanen O, Tokola T, et al. Effect of vege-

- tation cover on soil erosion in a mountainous watershed [J]. *Catena*, 2008, 75(3): 319-325.
- [9] Zhou F C, Han X, Tang S, et al. An improved model for evaluating ecosystem service values using land use/cover and vegetation parameters[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2021, 35(1): 148-156.
- [10] Lunt I D, Winsemius L M, McDonald S P, et al. How widespread is woody plant encroachment in temperate Australia? Changes in woody vegetation cover in lowland woodland and coastal ecosystems in Victoria from 1989 to 2005[J]. *Journal of Biogeography*, 2010, 37(4): 722-732.
- [11] Garcia-Leoz V, Villegas J C, Suescun D, et al. Land cover effects on water balance partitioning in the Colombian Andes: Improved water availability in early stages of natural vegetation recovery[J]. *Regional Environmental Change*, 2018, 18(4): 1117-1129.
- [12] Feng X, Vico G, Porporato A. On the effects of seasonality on soil water balance and plant growth[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(5): 1-12.
- [13] Wang F T, An P L, Huang C, et al. Is afforestation-induced land use change the main contributor to vegetation dynamics in the semiarid region of North China? [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 88: 282-291.
- [14] Jiang C, Zhang H Y, Zhao L L, et al. Unfolding the effectiveness of ecological restoration programs in combating land degradation: Achievements, causes, and implications [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 748: e141552.
- [15] Zhang J, Niu J M, Bao T L G, et al. Human induced dryland degradation in Ordos Plateau, China, revealed by multilevel statistical modeling of normalized difference vegetation index and rainfall time-series [J]. *Journal of Arid Land*, 2014, 6(2): 219-229.
- [16] Wang H, Liu G H, Li Z S, et al. Assessing the driving forces in vegetation dynamics using net primary productivity as the indicator: A case study in Jinghe River Basin in the Loess Plateau [J]. *Forests*, 2018, 9: e9070374.
- [17] 刘洋, 孙保平, 杨坪坪, 等. 模拟植被地表覆盖率与地表粗糙度对坡面流速的影响 [J]. *浙江农业学报*, 2017, 29(3): 498-505.
- [18] Dx A, Zw B. Identifying land restoration regions and their driving mechanisms in inner Mongolia, China from 1981 to 2010 [J]. *Journal of Arid Environments*, 2019, 167: 79-86.
- [19] Hayas A, Poesen J, Vanwalleghem T. Rainfall and vegetation effects on temporal variation of topographic thresholds for gully initiation in Mediterranean cropland and olive groves [J]. *Land Degradation and Development*, 2017, 28(8): 2540-2552.
- [20] Li X R, Zhang D H, Zhang F, et al. The eco-hydrological threshold for evaluating the stability of sand-binding vegetation in different climatic zones [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 83: 404-415.
- [21] Chen J, Xiao H B, Li Z W, et al. Threshold effects of vegetation coverage on soil erosion control in small watersheds of the red soil hilly region in China [J]. *Ecological Engineering*, 2019, 132: 109-114.
- [22] Jiang C, Liu J G, Zhang H Y, et al. China's progress towards sustainable land degradation control: Insights from the northwest arid regions [J]. *Ecological Engineering*, 2019, 127: 75-87.
- [23] 孙一, 刘晓燕, 田勇, 等. 坡面水沙运动对植被覆盖度的响应特性试验研究 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(3): 632-641.
- [24] Yang X N, Sun W Y, Li P F, et al. Reduced sediment transport in the Chinese Loess Plateau due to climate change and human activities [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 591-600.
- [25] Dunkerley D. An approach to analysing plot scale infiltration and runoff responses to rainfall of fluctuating intensity [J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(1): 191-206.
- [26] Mei X M, Zhu Q K, Ma L, et al. Effect of stand origin and slope position on infiltration pattern and preferential flow on a Loess hillslope [J]. *Land Degradation and Development*, 2018, 29(5): 1353-1365.
- [27] Jia Y H, Shao M A. Temporal stability of soil water storage under four types of revegetation on the northern Loess Plateau of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 117: 33-42.
- [28] 郑明国, 梁晨, 廖义善, 等. 极端降雨情形下黄土区水土保持治理的减沙效益估算 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37(5): 147-156.
- [29] 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(9): 1149-1156.
- [30] 胡春宏, 张治昊. 论黄河河道平衡输沙量临界阈值与黄土高原水土流失治理度 [J]. *水利学报*, 2020, 51(9): 1015-1025.
- [31] 江忠善, 李秀英. 黄土高原土壤流失预报方程中降雨侵蚀力和地形因子的研究 [J]. *中国科学院西北水土保持研究所集刊*, 1988(1): 40-45.
- [32] Dougherty W J, Nash D M, Cox J W, et al. Small-scale, high-intensity rainfall simulation under-estimates natural runoff P concentrations from pastures on hill-slopes [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2008, 46(8): 694-702.

- [33] Lázaro R, Calvo-Cases A, Lázaro A, et al. Effective run-off flow length over biological soil crusts on silty loam soils in drylands [J]. *Hydrological Processes*, 2014, 29(11): e10345.
- [34] Chen H, Cai Q G. Impact of hillslope vegetation restoration on gully erosion induced sediment yield [J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 2006, 49(2): 176-192.
- [35] Liu J B, Gao G Y, Wang S, et al. The effects of vegetation on runoff and soil loss: Multidimensional structure analysis and scale characteristics [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(1): 59-78.
- [36] Salah A M A, Prasse R, Marschner B. Intercropping with native perennial plants protects soil of arable fields in semi-arid lands [J]. *Journal of Arid Environments*, 2016, 130: 1-13.
- [37] Zhang Y H, Niu J Z, Yu X X, et al. Effects of fine root length density and root biomass on soil preferential flow in forest ecosystems [J]. *Forest Systems*, 2015, 24(1): 1-13.
- [38] Li Y Y, Shao M A. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 64(1): 77-96.
- [39] Zhao X N, Wu P T, Chen X L, et al. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on hillslopes in the Loess Plateau of China [J]. *Soil Research*, 2013, 51(1): 50-58.
- [40] 陈佳, 李忠武, 方怒放, 等. 红壤丘陵区不同植被覆盖阈值小流域时空分布规律 [J]. *水土保持研究*, 2023, 30(2): 1-7.
- [41] 黄萱, 丁继辉, 邹钰文, 等. 黄河中游河龙区间侵蚀产沙对景观特征的非线性响应 [J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6): 88-94.
- [42] 张琨, 吕一河, 傅伯杰, 等. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值 [J]. *地理学报*, 2020, 75(5): 949-960.
- [43] 蒋定生, 江忠善, 侯喜禄, 等. 黄土高原丘陵区水土流失规律与水土保持措施优化配置研究 [J]. *水土保持学报*, 1992, 6(3): 14-17.
- [44] Ina G, Jens O, Leishman M R. Urban stormwater run-off promotes compression of saltmarshes by freshwater plants and mangrove forests [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 637/638: 137-144.
- (上接第 119 页)
- [20] 李冠稳, 高晓奇, 肖能文. 基于关键指标的黄河流域近 20 年生态系统质量的时空变化 [J]. *环境科学研究*, 2021, 34(12): 2945-2953.
- [21] Wu S P, Gao X, Lei J Q, et al. Ecological environment quality evaluation of the Sahel region in Africa based on remote sensing ecological index [J]. *Journal of Arid Land*, 2022, 14(1): 14-33.
- [22] 江田汉, 邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题: 以在气候变化研究中的应用为例 [J]. *地理科学*, 2004(2): 177-182.
- [23] 耿静, 徐栋, 吴御豪, 等. 海南岛生态环境质量时空变化及其对气候变化与人类活动的响应 [J]. *生态学报*, 2022, 42(12): 1-12.
- [24] 张文强, 孙从建, 李新功. 晋西南黄土高原区植被覆盖度变化及其生态效应评估 [J]. *自然资源学报*, 2019, 34(8): 1748-1758.
- [25] 王法漂, 何晓宇, 方泽兴, 等. 基于长时间序列遥感数据的阿伯德尔国家公园生态环境质量评价 [J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(9): 1479-1489.
- [26] 李婷婷, 马超, 郭增长. 基于 RSEI 模型的贺兰山长时序生态质量评价及影响因素分析 [J]. *生态学杂志*, 2021, 40(4): 1154-1165.
- [27] 张含玉, 方怒放, 史志华. 黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应 [J]. *生态学报*, 2016, 36(13): 3960-3968.
- [28] 贺鹏, 毕如田, 徐立帅, 等. 基于地理探测的黄土高原植被生长对气候的响应 [J]. *应用生态学报*, 2022, 33(2): 448-456.
- [29] 何艳芬, 张晓. 陕西省 1980—2006 年气候变化时空特征研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(11): 59-63.
- [30] 高滢, 孙虎, 徐崑尧, 等. 陕西省植被覆盖时空变化及其对极端气候的响应 [J]. *生态学报*, 2022, 42(3): 1022-1033.
- [31] 杨屹, 加涛. 21 世纪以来陕西生态足迹和承载力变化 [J]. *生态学报*, 2015, 35(24): 7987-7997.
- [32] 何盈利, 尤南山, 崔耀平, 等. 2000 年来中国生态状况时空变化格局 [J]. *自然资源学报*, 2021, 36(5): 1176-1185.
- [33] 王同达, 曹锦雪, 赵永华, 等. 基于 PSR 模型的陕西省土地生态系统健康评价 [J]. *应用生态学报*, 2021, 32(5): 1563-1572.
- [34] 梅志坤. 陕西黄河流域土地利用变化及其景观生态风险评价 [D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [35] 耿甜伟, 陈海, 张行, 等. 基于 GWR 的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析 [J]. *自然资源学报*, 2020, 35(7): 1714-1727.