

模拟降雨下坡面草带分布对产流产沙过程的影响

孙若修^{1,2}, 申明爽¹, 胡亚伟¹, 徐勤涛¹, 张建军^{1,2,3,4}

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站(北京林业大学),山西 吉县 042200;3.水土保持国家林业局重点实验室(北京林业大学),北京 100083;4.北京市水土保持工程技术研究中心(北京林业大学),北京 100083)

摘要:为深入探讨坡面植被分布对产流产沙过程的影响,定量分析植被分布与坡面产流产沙的关系,通过人工降雨试验,在15°坡面条件下,对不同植被覆盖度(40%,60%)、不同降雨强度(30,60,90 mm/h)和不同植被分布位置(相对距离为0,0.2,0.4,0.6,0.8,1.0)条件下的坡面产流产沙进行观测,分析不同植被分布条件下的水土保持作用,提出了不同覆盖度下控制水土流失的植被优化配置。结果表明:(1)在一定坡度和降雨强度条件下,不同植被分布条件下坡面产流率和产沙率均表现为先迅速增加后趋于稳定的变化趋势;(2)坡面平均产流率和产沙率随着相对距离的增加表现出先减小后增大的趋势,植被相对距离为0.2的坡面的平均产流率在不同实验条件下均为最小;(3)通过随机森林算法发现,降雨强度和植被覆盖度对产流具有重要影响,降雨强度和植被相对距离对产沙具有重要影响;(4)当植被覆盖度为40%时,以减少径流和泥沙为主要目标的最优化植被相对位置分别为0~0.36,0~0.31;当植被覆盖度为60%时,以减少径流和泥沙为主要目标的最优化植被相对位置分别为0~0.43,0~0.22。表明坡面植被分布对产流产沙有重要的影响,在相同植被覆盖度条件下,草带的相对距离越小,对减少径流和泥沙的作用较好。研究成果可为生态恢复过程中植被的优化配置提供理论依据和数据支撑。

关键词:土壤侵蚀;植被分布;径流;泥沙;晋西黄土区

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)04-0022-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.04.004

Effect of Grass Belt Distribution on Runoff and Sediment Yield Under Simulated Rainfall

SUN Ruoxiu^{1,2}, SHEN Mingshuang¹, HU Yawei¹, XU Qintao¹, ZHANG Jianjun^{1,2,3,4}

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.National Field Research Station of Forest Ecosystem in Ji County (Beijing Forestry University), Ji County, Shanxi 042200; 3.Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation (Beijing Forestry University), Beijing 100083; 4.Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education (Beijing Forestry University), Beijing 100083)

Abstract: In order to deeply explore the influence of slope vegetation distribution on the process of sediment and runoff yield, and quantitatively analyze the relationship between vegetation distribution and sediment and runoff yield on slope, through artificial rainfall test, under the condition of 15° slope, the sediment and runoff yield process were observed under the conditions of different vegetation coverages (40% and 60%), different rainfall intensities (30, 60 and 90 mm/h) and different vegetation distribution positions (relative distance 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 and 1.0). The effects of soil and water conservation under different vegetation distribution conditions was analyzed, and the optimal vegetation allocation for controlling soil and water loss under different vegetation coverages was proposed. The results showed that: (1) Under a certain slope and rainfall intensity, the runoff and sediment yield increased rapidly at first and then tended to be stable under different vegetation distribution conditions. (2) In this study, the average runoff and sediment yield firstly decreased and then increased with the increasing of the relative distance. The average runoff yield of the slope with the relative distance of 0.2 was the minimum under different experimental conditions. (3) The random

收稿日期:2021-12-21

资助项目:国家重点研发计划项目(2022YFE0104700)

第一作者:孙若修(1990—),男,在读博士研究生,主要从事水土保持与土壤侵蚀研究。E-mail:sunruoxiu0331@126.com

通信作者:张建军(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事水土保持、森林水文、植被恢复、生态效益评价研究。E-mail:zhangjianjun@bjfu.edu.cn

forest algorithm showed that rainfall intensity and vegetation coverage had important impact on runoff yield, and rainfall intensity and vegetation relative distance had important impact on sediment yield. (4) When the vegetation coverage was 40%, the optimal vegetation relative positions were 0 to 0.36 and 0 to 0.31, respectively, with the main objective of reducing runoff and sediment. When the vegetation coverage was 60%, the optimal relative vegetation positions were 0 to 0.43 and 0 to 0.22, respectively, with the main goal of reducing runoff and sediment. This study showed that slope vegetation distribution had an important impact on sediment yield and runoff. Under the same vegetation coverage, the smaller the relative distance of the grass belt was, the better the effect of reducing runoff and sediment. The research results could provide theoretical basis and data support for optimal allocation of vegetation in the process of ecological restoration.

Keywords: soil erosion; vegetation distribution; runoff; sediment; the Loess Region of Western Shanxi Province

众所周知,中国的黄土高原是全国乃至世界土壤侵蚀最严重的地区^[1],也是黄河泥沙的主要来源^[2-3]。为了控制黄土高原严重的水土流失,国家从20世纪50年代开始采取一系列的措施治理水土流失^[4],其中植物措施在拦蓄泥沙方面起到主要作用^[5-6]。由于黄土高原地处我国干旱半干旱地区,降水量有限,土壤水对植被的承载能力有限,因此植被的布局和配置是目前黄土高原地区植被建设中需要解决的问题之一^[7]。

众多学者^[7-10]对植被配置与土壤侵蚀的关系进行大量的研究,目前的研究主要围绕植被的类型、组成、大小、分布位置及发育程度等角度研究植被对坡面产流产沙的影响。这些研究中有大量关于植被空间分布位置的研究,如Pan等^[8]通过室内模拟试验,分析植被空间分布位置对土壤侵蚀的控制作用发现,种植在下坡位的草带能有效减少水土流失,而种植在上坡位的草带对土壤侵蚀的控制有限;此外研究还发现,植被空间分布对土壤侵蚀的控制作用大于对径流的控制作用,该研究建议在植被配置时,将草带尽可能布设在下坡位,有利于减少坡面径流和泥沙;张霞等^[7]的研究与Pan等^[8]的研究结果不同,在坡沟系统中,植被布设在坡面的中下部,蓄水拦沙效果最好,能够实现最好的水土保持效益;根据以往研究^[11-13]结果发现,当植被布设在坡面的中下部或者下部时,其拦沙蓄水效果最好,这主要是植被位于坡下部时,能够减小降雨对坡面下部土壤的溅蚀作用,同时还能拦蓄坡面上部和坡面中部的径流,沉积径流中的泥沙,而坡面中部和坡面上部的植被虽然能减小坡面上部和中部的雨滴溅蚀作用,但是对于坡面下部的土壤起不到保护作用,坡面中上部产生的径流和泥沙还会增加坡面下部的侵蚀,进一步加剧坡面下部的土壤侵蚀。现有研究针对植被不同坡位分布的侵蚀特征^[14-15]研究较多,但有关坡面植被在不同降雨条件下减少产流和产沙的最佳分布范围研究还有所欠缺,从而导致各类侵蚀产沙模型中缺少反映植被位置对侵蚀影响的量化参数,未能深入揭示

导致侵蚀产沙变化的作用机制^[16-17]。因此,定量评价不同植被分布条件对坡面产流产沙的影响,进而确定不同降雨条件下植被的最佳空间位置,对植被恢复过程中植被的优化配置具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究采用的试验土槽为可移动式变坡土槽,坡度调整范围为0~60°,土槽的长、宽和高分别为2,1,0.5 m,土槽上侧、左右两侧均设置10 cm高的挡板,防止人工降雨时雨滴击溅使土壤颗粒溅出。人工土槽的径流收集口采用“V”形设计,并连接径流桶,用于收集人工降雨试验坡面产生的径流和泥沙。土槽底部有均匀分布的透水孔,有利于人工降雨过程中土壤水能够自由下渗,以免在土槽内产生积水而影响试验效果。试验土壤采集点在山西省吉县蔡家川小流域,野外取土点的土地利用类型为草地,土壤为褐土,黄土母质,土壤容重为 $(1.38 \pm 0.01) \text{ g/cm}^3$ 。粒径为0~0.002,0.002~0.05,0.05~2 mm的颗粒分别占总量的3.89%,65.22%,30.89%。人工降雨器采用的是下喷式人工模拟降雨机(EL-RS3),其有效降雨覆盖面积为4.5 m×2.2 m,均匀系数>90%,满足室内人工降雨试验的需要。

1.2 试验设计

根据研究区土壤特征,本试验设计的土壤容重为 1.38 g/cm^3 。采集草地0—20 cm土壤并存放至阴凉处自然风干,过10 mm的土筛,除去土壤中的植物根系、砾石和枯落物,以免对土壤的结构造成影响,并通过烘干法测定土壤的含水量。晋西黄土区降雨主要呈现短历时、高强度和长历时、低强度的特点^[18],基于降雨特征,设置3个梯度的人工降雨强度,即30,60,90 mm/h,为充分研究草带对坡面侵蚀产沙的影响过程,本试验从坡面产生径流开始进行60 min的人工降雨试验。山地丘陵地貌是晋西黄土区最主要的地貌类型,整个研究区的坡度范围为5°~40°,

其中坡度为 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 的面积最大,因此本试验设置坡度为 15° 。

本研究提出“相对距离”的概念,表示草带在坡面的相对位置,本研究中将“植被相对距离”定义为植被草带下缘裸地长度与坡面长度减去植被草带沿坡长度的

比值,相对距离的范围为 $0 \sim 1$ 。不同相对距离的植被采用带状草皮,40%植被覆盖度下草皮的尺寸为长 \times 宽为 $0.80 \text{ m} \times 0.50 \text{ m}$,60%植被覆盖度草皮的尺寸为长 \times 宽为 $1.20 \text{ m} \times 0.50 \text{ m}$,根据试验设计,在坡面相应位置铺设人工草皮(图 1)。每个试验设计进行 2 次重复。

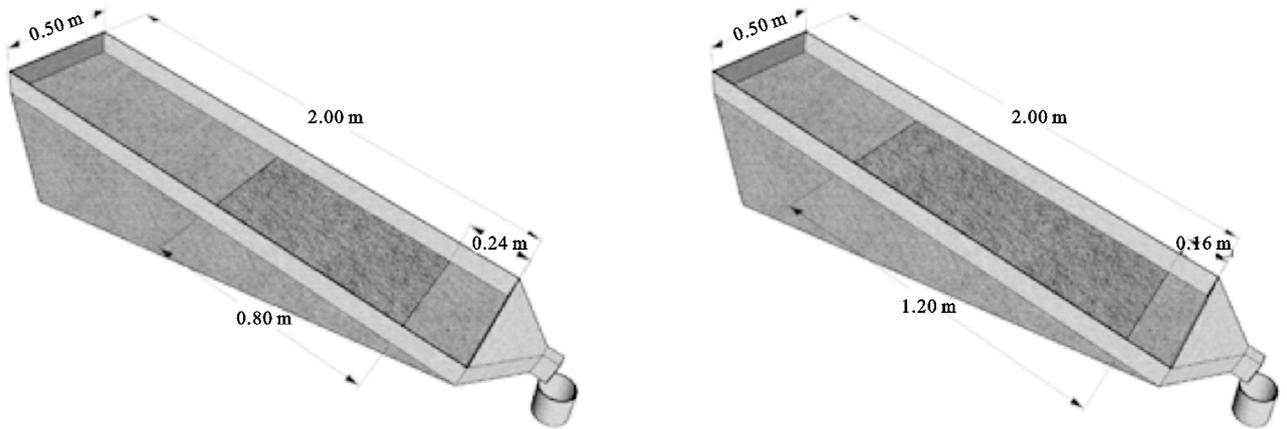


图 1 试验设计示意

1.3 试验方法

试验土槽铺设共分为 3 层,纱布层、细沙层(10 cm)和试验土层(30 cm),铺设纱布层和细沙层主要是为了保证土槽具有良好的透水性,使土槽内不发生积水。试验土层采用分层填装法,每层厚度 10 cm,按照试验设计的土壤容重,通过土槽体积和供试土壤含水量计算需要填充的土壤质量。在填土过程中,每完成 1 层填土要对土壤表面进行刮毛处理,减小土层之间的边界效应。每层土壤厚度为 10 cm。

每次降雨试验前需要对降雨强度进行率定,以满足试验设计,同时对坡面进行预降雨试验,以保证土壤初始含水量一致,预降雨采用的降雨强度为 20 mm/h ,当坡面开始产流时停止预降雨,预降雨结束后,需要对土槽坡面进行覆盖,静置 24 h 后进行正式模拟降雨试验。每次降雨时间为坡面开始产流后 60 min。记录每场降雨的产流时间,在产流后的前 10 min,每 2 min 取 1 次径流样品,径流产生 10 min 后,每 5 min 收集 1 次径流样品,每场降雨试验总共收集试验样品 15 个。每次试验后使用量筒测定各样品的总径流量。样品沉淀 24 h 后,将上层澄清的液体从样品中分离出来,剩余的沉淀物转移到 1 个大铝盒中,并在 105°C 的烘箱中干燥 24 h。

1.4 数据分析

(1)产流率。选择坡面产流率^[19]($\text{mm}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$)表征不同植被条件下坡面的产流状况。

$$R_y = \frac{V}{t \times S} \quad (1)$$

式中: V 为收集每个样品的总径流量(mL); t 为收集每个样品所用时间(min); S 为试验小区的面积(m^2)。

(2)产沙率。选择坡面产沙率^[19]($\text{g}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$)表征不同植被条件下坡面的产沙状况。

$$R_y = \frac{M}{t \times S} \quad (2)$$

式中: M 为收集每个样品的总泥沙量(g); t 为收集每个样品所用时间(min); S 为试验小区的面积(m^2)。

(3)随机森林。随机森林算法^[20]利用 OOB 误差计算特征变量重要性,首先根据袋外数据计算随机森林中每个分类树的袋外误差(E),然后随机改变袋外数据第 j 个特征变量(X^j)的值,并计算新的袋外误差(E^j_i);最后,变量 X^j 的重要性 [$I(X^j)$] 表示为:

$$[I(X^j)] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E^j_i - E_i) \quad (3)$$

变量 X^j 的变化引起的袋外误差增加得越大,精度减少得越多,说明该变量越重要。根据相关的研究成果^[20]表明,随机森林算法能够避免剔除重要的变量,这些重要变量可能与其他变量具有相关性。

利用随机森林算法可以得到决策树中每个变量的重要性,这个重要性显示了变量对分类的贡献,根据重要性的大小可以进行特征选择,重要性值越大,优先考虑为特征影响因素。%IncMSE 和 IncNode Purity 都可以进行输入变量的重要性排序,是评判重要性的标准,两者数值越大,说明输入变量对模型的影响程度越大。

(4)数据处理。利用 IBM SPSS Statistics 25.0 软件中的 ANOVA 和 Duncan 多重极差检验对不同雨强、坡度和不同植被相对距离条件下的产流和产沙结果进行显著性检验。随机森林利用 R 语言进行处理,利用 Excel 2016 记录整理试验数据,利用 Origin 2017 软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同植被相对距离坡面产流过程特征

随着降雨过程的进行,不同植被相对距离的坡面产流率变化过程趋势基本一致(图2),降雨初期坡面产流率最小,随着降雨的进行,土壤含水量逐渐增大,土壤入渗减小,坡面径流增大,使坡面产流率迅速增加,当土壤含水量达到最大饱和土壤含水率时,土壤产流率趋于相对稳定状态。

通过对不同试验条件的对比发现,坡面初始产流率随着植被相对距离的增大而增大,最小初始产流率均为植被相对距离为0的坡面,在不同试验条件下,其初始产流率范围为0.054~0.58 mm/(min·m²),而平均产流率表现出与初始产流率不同的结果;随着植被相对距离的增大,平均产流率在植被覆盖率为40%条件下的大小为植被相对距离1.0>植被相对距离0.8>植被相对距离0.6>植被相对距离0.4>相对距离0>植被相对距离0.2。经ANOVA方差分析表

明,不同植被相对距离的平均产流率在不同降雨强度条件下均表现为显著性差异($p < 0.05$);当植被覆盖度提高到60%时,平均产流率的大小为植被相对距离1.0>植被相对距离0.8>植被相对距离0.6>植被相对距离0>植被相对距离0.4>植被相对距离0.2。经ANOVA方差分析表明,植被相对距离为0,0.2,0.4的平均产流率在不同降雨强度条件下均显著小于植被相对距离为0.6,0.8,1的坡面($p < 0.05$)。在所有试验中,植被相对距离0.2的坡面的平均产流率在不同植被覆盖度和降雨强度条件下均为最小。

利用随机森林算法对影响坡面产流率的变量进行重要性排序,模型的预测结果与实际结果的拟合度(R^2)达到0.81,表示模型的拟合度较好。从表1可以看出,降雨强度靠前,说明降雨强度是影响坡面产流率最重要的因素。此外,试验结果表明,随着植被覆盖度的增加,不同植被相对距离坡面的初始产流率、平均产流率和稳定产流率均减小。

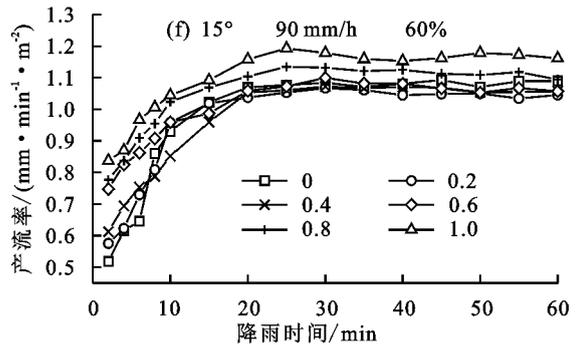
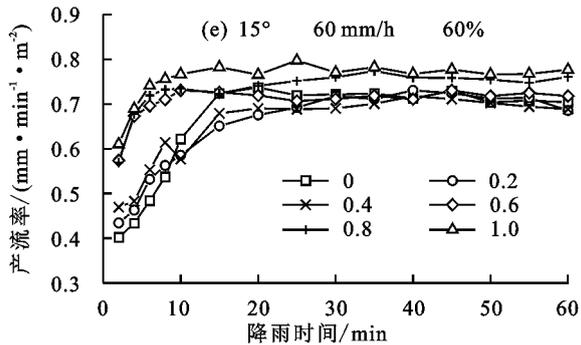
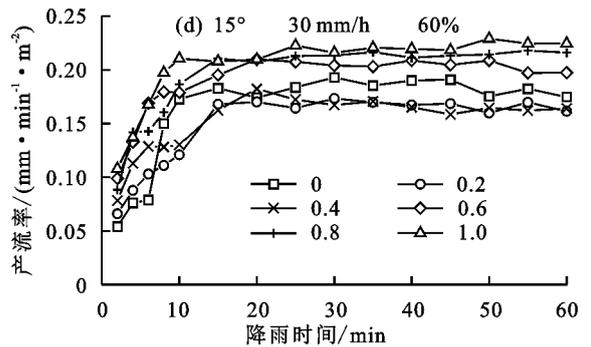
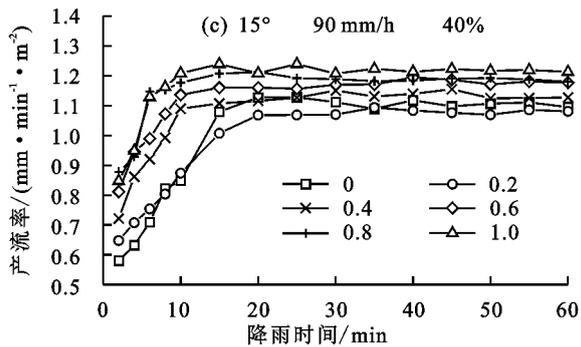
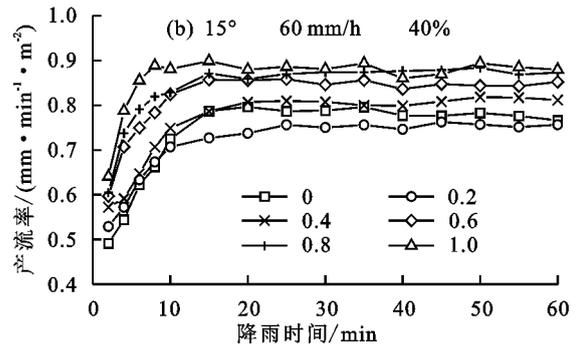
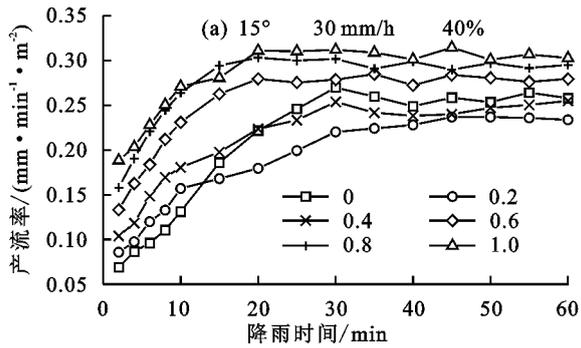


图2 不同植被相对距离条件下坡面产流率

2.2 不同植被相对距离坡面产沙过程分析

不同植被相对距离坡面的产沙率具有相似的变

化趋势(图3),这个变化过程可以分为3个阶段,首先是降雨初期,随着坡面径流的增加,产沙率迅速增

加,直至达到产沙率最大值,随着降雨的进行,产沙率开始缓慢减小,最终趋于稳定。

试验结果发现,不同植被相对距离坡面产沙率达到稳定状态的时间差异较大。各类试验条件下,随着植被相对距离的增大,坡面产沙率达到稳定状态的时间越短,而植被相对距离为 0 和 0.2 的坡面达到稳定产沙率的时间最长,约 20 min;同时坡面平均产沙率也随着植被相对距离的增大而减小,平均产沙率最小的坡面为植被相对距离 0.2 的坡面(图 3)。经 ANOVA 方差分析表明,植被相对距离为 0 和 0.2 的坡面平均产沙率在不同降雨强度条件下均显著小于其他植被相对距离的坡面($p < 0.05$)。利用随机森林算法对影响坡面平均产沙率的变量进行重要性排序,模型的预测结果与实际结果的拟合度(R^2)达到 0.87,表示模型的拟合度较

好。从表 2 可以看出,降雨强度排序靠前,说明降雨强度是影响坡面平均产沙率最重要的因素。在本研究中,植被覆盖度为 40%时,降雨强度从 30 mm/h 增加到 60 mm/h,不同植被相对距离坡面的平均产沙率从 2.23 g/(min·m²)增加到 6.39 g/(min·m²);当降雨强度增加到 90 mm/h,平均产沙率增加到 13.52 g/(min·m²)。随着植被覆盖度的提高,不同植被相对距离的坡面产沙率均显著减小($p < 0.05$)。

表 1 利用随机森林算法对影响坡面平均产流率的因素重要性排序

影响因素	%IncMSE	IncNodePurity
降雨强度	14.281664	5.2495483
植被覆盖度	-1.323657	0.1987303
相对距离	-2.878660	0.4758990

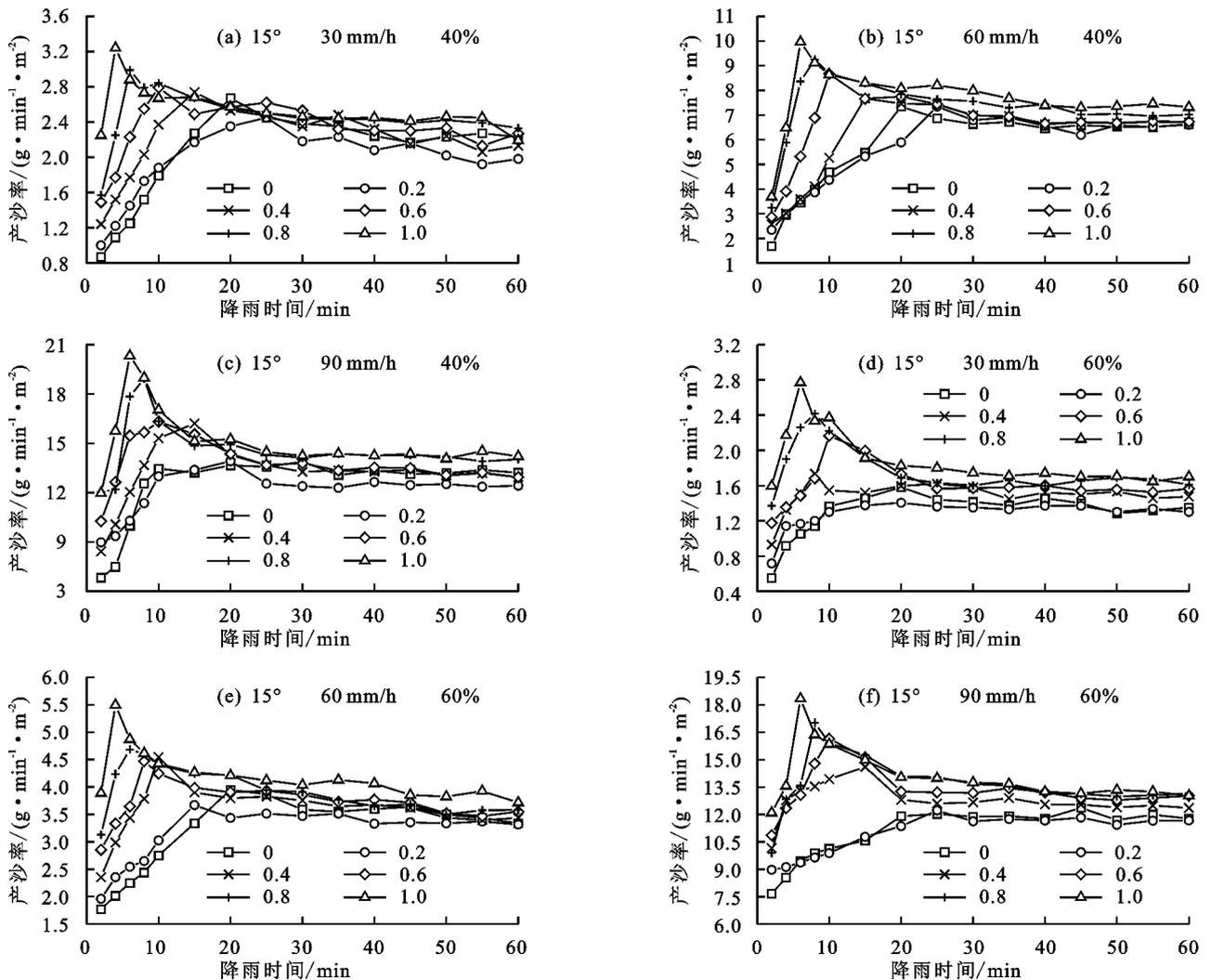


图 3 不同植被相对距离条件下坡面产沙率

表 2 利用随机森林算法对影响坡面平均产沙率的因素重要性排序

影响因素	%IncMSE	IncNodePurity
降雨强度	13.211	1020.054
植被覆盖度	0.688	42.649
相对距离	3.510	70.527

2.3 坡面植被相对距离的优化配置

植被不同空间位置均能显著减少产流量和产沙量,但植被不同空间位置之间的产流量和产沙量之间也存在差异(图 4)。然而,目前有关植被空间位置对土壤侵蚀的影响研究主要通过定性方法进行表述,这种表述方法比较绝对,本研究针对这个问题提出“相

对距离”参数,以定量反映植被空间位置对水土流失的影响,并根据防治水土流失的效果确定坡面植被的最优化空间位置。不同试验条件下,坡面累积产流量和累积产沙量均随着植被相对距离的增加,整体呈现先减小后增加的趋势。但累积产流量和累积产沙量在不同试验条件下略有差异,坡面累积产流量大小在 40% 植被覆盖度条件下均表现为植被相对距离 0.2 < 植被相对距离 0 < 植被相对距离 0.4 < 植被相对距离 0.6 < 植被相对距离 0.8 < 植被相对距离 1 (图 4a)。经 ANOVA 方差分析表明,植被相对距离为 0.2 的坡面累积产流量在不同降雨强度条件下均显著小于其他植被相对距离坡面 ($p < 0.05$); 当植被覆盖度为

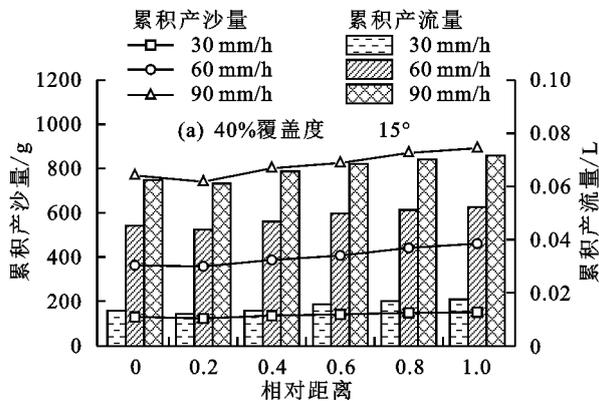


图 4 不同植被相对距离条件下累积产流量和累积产沙量

综上所述,本研究在现有试验条件下,植被对控制径流和泥沙的最优空间位置是植被相对距离为 0.2 的坡面,因此在植被恢复过程中,植被覆盖度一定的条件下,建议优先将植被配置在相对距离为 0.2 的位置上。此外,植被相对距离 < 0.4 时,坡面植被均表现出良好的减流、减沙效益,这表明植被的空间位置对控制产流和产沙存在一个最优的区域范围。为进一步确定植被空间位置的最优范围,本研究对坡面植被相对距离与产流和产沙数据进行进一步分析发现,植被相对距离范围在 0~0.2 内,产流量和产沙量均表现为减小趋势,而植被相对距离 0.2~1.0 的坡面的产流量和产沙量均表现为增加趋势,对植被相对距离为 0.2~1.0 范围内的产流产沙数据进行分析,拟合植被相对距离与产流量和产沙量的函数关系,产流量和产沙量与植被相对距离函数关系均表现为 $y = ax + b$ 的线性相关关系(表 3)。结合植被相对距离为 0 时的坡面产流和产沙情况,确定植被空间最优化位置,当植被覆盖度为 40% 时,以减少径流为主要目标的最优化植被相对位置为 0~0.36,以减少泥沙为主要目标的最优化植被相对位置为 0~0.31; 当植被覆盖度为 60% 时,以减少径流为主要目标的最优化植被相对位置为 0~0.43,以减少泥沙为主要目标的最优化植被相对位置为 0~0.22。

60% 时,坡面累积产流量大小表现为植被相对距离 0.2 < 植被相对距离 0.4 < 植被相对距离 0 < 植被相对距离 0.6 < 植被相对距离 0.8 < 植被相对距离 1.0 (图 4b)。在降雨强度为 30 mm/h 时,植被相对距离为 0.2 的坡面累积产流量显著小于其他试验坡面,但降雨强度为 60, 90 mm/h 时,植被相对距离为 0.2 和 0.4 的坡面累积产流量无显著性差异 ($p < 0.05$)。坡面累积产沙量大小在植被覆盖度为 40% 和 60% 条件下均表现为植被相对距离 0.2 < 植被相对距离 0 < 植被相对距离 0.4 < 植被相对距离 0.6 < 植被相对距离 0.8 < 植被相对距离 1.0 (图 4), 植被相对距离为 0, 0.2 的坡面累积产沙量显著小于其他试验坡面 ($p < 0.05$)。

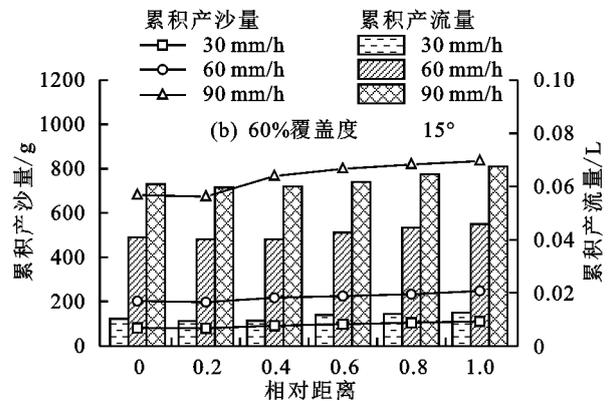


表 3 坡面植被相对距离(0.2~1.0)与产流量和产沙量的关系

植被覆盖度/%	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	拟合函数	R ²	植被优化位置
40	30	$y_1 = 7.345x + 10.705$	0.959	0~0.36
		$y_2 = 0.0073x + 118.310$	0.943	0~0.31
	60	$y_1 = 10.694x + 42.360$	0.949	0~0.27
		$y_2 = 130.590x + 332.140$	0.994	0~0.23
	90	$y_1 = 12.772x + 59.767$	0.938	0~0.21
		$y_2 = 186.220x + 714.330$	0.971	0~0.29
60	30	$y_1 = 4.571x + 8.309$	0.899	0~0.43
		$y_2 = 38.168x + 72.987$	0.981	0~0.20
	60	$y_1 = 7.829x + 38.009$	0.948	0~0.37
		$y_2 = 58.590x + 188.300$	0.862	0~0.22
	90	$y_1 = 10.119x + 56.628$	0.930	0~0.40
		$y_2 = 186.540x + 666.520$	0.855	0~0.20

注:表中 x 表示坡面植被相对距离; y_1 表示产流量; y_2 表示产沙量;每个拟合函数的样本数为 10。

3 讨论

目前大量研究^[18,21-22]结果证明,植被对土壤具有保护和改良作用,然而在植被恢复过程中,仍然存在诸多问题,特别是植被恢复过程中的植被配置问题。在坡面尺度上合理的植被配置不仅能加快植被恢复的速度,而且能够显著减少土壤侵蚀,保护生态环境,但在植被恢复过程中植被配置不合理影响植被恢复效果,进而影响植被的水土保持作用,使植被恢复进

入恶性循环状态,甚至造成严重的水土流失。因此,在植被恢复过程中植被配置是一个重要的考虑因素。黄土高原地处我国干旱、半干旱地区,降水较少,蒸发量较大,该地区地形多为山地和低矮丘陵,受地形影响,可利用的土地资源十分有限,因此在植被恢复过程中常常出现社会发展与植被恢复相矛盾,人地关系不和谐,进而影响植被恢复,也阻碍社会经济的发展^[23]。与以往研究^[7]一致,本研究发现,不同植被空间位置对坡面产流产沙有显著的影响($p < 0.05$),然而植被空间位置不同,对控制土壤侵蚀的作用也存在差异。

本研究中植被相对距离为 0.2 时,其拦沙蓄水效果最好,这主要是植被位于坡下部时,能够减小降雨对坡面下部土壤的溅蚀作用,同时植被的空间异质性改变径流的集中过程和径流运动过程,改变流速,虽然坡面上部产生大量径流,但植物带能拦蓄坡面上部和坡面中部的径流,通过坡面产流过程可以发现,不同植被相对距离的坡面产流出现滞后性,这表明植被的拦蓄作用得到充分的发挥,使径流中的泥沙得到沉积;此外植被带使径流流速减缓,从而减小对坡面下部土壤的侵蚀作用^[7-8,11]。当植被相对距离为 0 时,坡面植被对土壤侵蚀的控制作用小于植被相对距离为 0.2 的坡面,这主要是因为植被位于坡面最下部,坡面中上部产生更多的径流和泥沙,植被带对径流和泥沙的控制能力有限,使坡面产生的径流和泥沙从出口断面流出,这与张霞等^[7]的研究结果一致;当植被相对距离逐渐增加时,坡面产流量和产沙量逐渐增大,虽然植被带对坡面上部的径流和泥沙有较强的调控作用,但随着植被相对距离的增加,坡面下部的裸地面积增大,下部坡面失去植被的保护作用,产生较多的径流和泥沙^[24-26],并且植被相对距离越大,坡面下部裸地面积越大,产生的径流和泥沙越多。因此,植被越靠近坡面中下部,对坡面径流和泥沙的控制作用越强,坡面植被的蓄水能力和对泥沙的拦截能力越强^[27-28]。在生态恢复过程当中,建议将植被优先布设在坡面中下部,综合考虑植被水土保持作用,本研究建议植被布设位置为植被相对距离范围为 0~0.22 的坡面上。

4 结论

(1)不同植被相对距离的坡面产流和产沙过程分别表现为增长—稳定型和增加—减小—稳定型;同时植被相对距离为 0,0.2 和 0.4 的坡面累积产流量和累积产沙量均显著小于其他植被相对距离的坡面;植被覆盖度对产流和产沙也有重要的影响,随着植被覆盖度的增加,不同植被相对距离坡面的产流率和产沙率减小,随着植被相对距离的增加,坡面平均产流率和产沙率表现出先减小后增大的趋势,植被相对距离为 0.2 的坡面的平均产流率在不同试验条件下均为最小。

(2)通过随机森林算法发现,降雨强度和植被覆盖度对坡面产流有重要影响,而产沙过程受降雨强度和植被相对距离的影响较大。

(3)植被空间位置的优化配置受植被覆盖度的影响,当植被覆盖度为 40% 时,分别以减少径流和泥沙为主要目标的最优化植被相对位置为 0~0.36 和 0~0.31;当植被覆盖度为 60% 时,分别以减少径流和泥沙为主要目标的最优化植被相对位置为 0~0.43 和 0~0.22。因此,在降水有限的地区开展坡面植被恢复时,应该优先恢复中下部坡面的植被。

参考文献:

- [1] Yu Y, Zhao W W, Martinez-Murillo J F, et al. Loess Plateau, from degradation to restoration[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 738: e140206.
- [2] 史志华, 宋长青. 土壤水蚀过程研究回顾[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 1-10.
- [3] Li M, Yao W Y, Ding W F, et al. Effect of grass coverage on sediment yield in the hillslope-gully side erosion system[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(3): 321-330.
- [4] Zheng M G, Cai Q G, Cheng Q J. Modelling the runoff-sediment yield relationship using a proportional function in hilly areas of the Loess Plateau, North China[J]. *Geomorphology*, 2008, 93(3/4): 288-301.
- [5] FU B J, Liu Y, Lue Y H, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China[J]. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284-293.
- [6] Zhou Z C, Shangguan Z P. The effects of ryegrass roots and shoots on loess erosion under simulated rainfall[J]. *Catena*, 2007, 70(3): 350-355.
- [7] 张霞, 李鹏, 李占斌, 等. 坡面草带分布对坡沟水土流失的防控作用及其优化配置[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(7): 122-128.
- [8] Pan C Z, Ma L. How the spatial distribution of grass contributes to controlling hillslope erosion[J]. *Hydrological Processes*, 2019, 34(1): 68-81.
- [9] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 等. 草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(3): 401-407.
- [10] 任柯蒙, 卫伟, 赵西宁, 等. 黄土丘陵区坡面植被盖度及其配置格局的水蚀效应模拟[J]. *生态学报*, 2018, 38(22): 8031-8039.
- [11] Zhang X, Li P, Li Z B, et al. Effects of precipitation and different distributions of grass strips on runoff and sediment in the loess convex hillslope[J]. *Catena*, 2018, 162: 130-140.
- [12] 田娜玲, 王占礼, 张琪琳, 等. 黄土区草地坡面片流阻力系数试验研究[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(4): 7-11.
- [13] 马勇勇, 李占斌, 任宗萍, 等. 草带布设位置对坡沟系统水文连通性的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(8):

- 170-176.
- [14] 宇涛,张霞,李占斌,等.不同草带覆盖位置条件下坡沟系统侵蚀产沙差异性[J].水土保持学报,2018,32(6):22-27.
- [15] 于国强,贾莲莲,朱冰冰,等.不同坡位的植被缓冲带对坡面侵蚀产沙来源的影响[J].水土保持研究,2020,27(6):9-13.
- [16] Ludwig J A, Eager R W, Bastin G N, et al. A leakiness index for assessing landscape function using remote sensing[J].Landscape Ecology,2002,17(2):157-171.
- [17] 朱冰冰,霍云霏,周正朝.黄土高原坡沟系统植被格局对土壤侵蚀影响研究进展[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(4):149-156.
- [18] Sun R X, Ma L, Zhang S H, et al. Study on landscape patches influencing hillslope erosion processes and flow hydrodynamics in the Loess Plateau of Western Shanxi Province, China[J].Water,2020,12:e3201.
- [19] 刘俊娥,王占礼,高素娟等.黄土坡面片流产流过程模拟研究[J].土壤学报,2013,50(2):268-274.
- [20] 刘斌,郭星,朱宇恩.基于随机森林模型的土壤重金属源解析,以晋中盆地为例[J].干旱区资源与环境,2019,33(1):106-111.
- [21] 杨汉宏,张勇,郑海峰,等.不同人工植物配置对排土场边坡水土流失的影响[J].水土保持通报,2017,37(4):6-11.
- [22] Kavian A, Saleh I, Habibnejad M, et al. Effectiveness of vegetative buffer strips at reducing runoff, soil erosion, and nitrate transport during degraded hillslope restoration in northern Iran[J].Land Degradation and Development,2018,29:3194-3203.
- [23] 李宗善,杨磊,王国梁,等.黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J].生态学报,2019,39(20):7398-7409.
- [24] 孙佳美,樊登星,梁洪儒,等.黑麦草调控坡面水沙输出过程研究[J].水土保持学报,2014,28(2):36-39.
- [25] Du J, Niu J Z, Gao Z L, et al. Effects of rainfall intensity and slope on interception and precipitation partitioning by forest litter layer[J].Catena,2019,172:711-718.
- [26] 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.
- [27] Curran J C, Hession W C. Vegetative impacts on hydraulics and sediment processes across the fluvial system[J].Journal of Hydrology Amsterdam,2013,13:364-376.
- [28] Yang S, Gao Z L, Li Y H, et al. Erosion control of hedgerows under soils affected by disturbed soil accumulation in the slopes of loess plateau, China[J].Catena,2019,181:e104079.
- (上接第21页)
- [33] 张建辉,刘刚才,倪师军,等.紫色土不同土地利用条件下的土壤抗冲性研究[J].中国科学 E 辑:科学技术,2003,33(增刊1):61-68.
- [34] 戴全厚,刘国彬,薛莲,等.侵蚀环境退耕撂荒地水稳性团聚体演变特征及土壤养分效应[J].水土保持学报,2007,21(2):61-64,77.
- [35] 王清奎,汪思龙.土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J].土壤通报,2005,36(3):415-421.
- [36] Felipe G, Robert L S, Eugene K. Effects of slash-and-burn management on soil aggregate organic C and N in a tropical deciduous forest[J].Geoderma,1999,88(1/2):1-12.
- [37] 严方晨,焦菊英,曹斌挺,等.黄土丘陵沟壑区撂荒地不同演替阶段植物群落的土壤抗蚀性:以坊塬流域为例[J].应用生态学报,2016,27(1):64-72.
- [38] 唐国勇,李昆,孙永玉,等.干热河谷4种固氮植物根瘤固氮潜力及其影响因素[J].林业科学研究,2012,25(4):432-437.
- [39] 李新悦,李冰,莫太相,等.长期秸秆还田对水稻土团聚体及氮磷钾分配的影响[J].应用生态学报,2021,32(9):3257-3266.
- [40] Sonal S, Jamuna S S. Water-stable aggregates and associated organic matter in forest, savanna, and cropland soils of a seasonally dry tropical region, India[J].Biology and Fertility of Soils,1996,22(1/2):76-82.
- [41] 张履勤,章明奎.林地与农地转换过程中红壤有机碳、氮和磷库的演变[J].浙江林学院学报,2006,23(1):75-79.
- [42] 胡钟胜,解燕,刘国庆,等.云南宣威市烟田耕作层土壤颗粒分形特征研究[J].土壤通报,2014,45(5):1038-1041.
- [43] Andre E, Kyungsoo Y, Peter C A, et al. Does soil erosion rejuvenate the soil phosphorus inventory[J].Geoderma,2018,332:45-59.
- [44] 丁文峰,丁登山.黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分形特征[J].地理研究,2002,21(6):700-706.
- [45] 罗清虎,孙凡,崔羽,等.泥石流频发流域失稳性坡面主要植物种间关联性[J].应用与环境生物学报,2018,24(4):689-696.
- [46] 李泽霞,董彦丽,马涛.黄土区梯化坡地不同土地利用方式对土壤理化性质的影响[J].水土保持通报,2020,40(3):43-49.
- [47] 袁勇,熊东红,校亮,等.元谋干热河谷冲沟不同部位土壤质量评价[J].西南农业学报,2018,31(10):2165-2172.
- [48] 肖鹏.海州露天煤矿排土场不同复垦模式土壤抗蚀性抗冲性研究[D].辽宁 阜新:辽宁工程技术大学,2019.
- [49] 黎建强,张洪江,陈奇伯,等.长江上游不同植物篱系统土壤抗冲、抗蚀特征[J].生态环境学报,2012,21(7):1223-1228.