

降雨条件下灌草配置方式对褐土坡面径流泥沙特征的影响

沈子雅^{1,2}, 程金花^{1,2}, 赵 澈³, 管 凝^{1,2}, 曾合州^{1,2}, 秦建森^{1,2}, 赵梦圆^{1,2}

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.国家林业局水土保持与荒漠化防治重点实验室,北京 100083;3.交通运输部公路科学研究所,北京 100088)

摘要:为探究不同灌草配置方式对褐土坡面土壤侵蚀的影响,通过室内模拟降雨试验,以种植灌木胡枝子(*Lespedeza bicolor Turcz.*)以及草本紫花苜蓿(*Medicago sativa L.*)的褐土坡面为研究对象,设计 3 种降雨强度(30,60,90 mm/h)、3 种灌草覆盖度(灌草覆盖度比例分别为 1:2(Ⅰ),2:1(Ⅱ),1:1(Ⅲ))以及 3 种灌草空间配置方式(灌木位于坡上(US)、坡中(MS)、坡下(LS)),分析降雨条件下不同灌草覆盖度及不同灌草空间配置交互作用下产流产沙及减流减沙特征。结果表明:(1)坡面产流产沙量在降雨初期大幅度增加,随后增加趋势逐渐减缓,最后趋于稳定。当灌丛位于坡下(LS)且灌草覆盖度为Ⅱ时,产流产沙量显著低于其他灌草配置方式。(2)不同灌草覆盖度减流减沙率大小关系为Ⅱ>Ⅰ>Ⅲ;不同灌草空间配置下减流减沙率大小关系为LS>MS>US。其中最大减流率达 61.58%,最大减沙率达 93.27%。不同灌草配置方式间的减流率及减沙率具有显著差异。(3)通过双因素方差分析研究灌草空间配置方式对坡面总产流产沙量的显著性和贡献率发现,灌草覆盖度和灌草空间配置对总产流量和总产沙量均有显著性影响($p<0.05$),但是灌草覆盖度和灌草空间配置交互作用对坡面总产流量和总产沙量影响并不显著。(4)灌丛于坡下、灌丛覆盖度为 50%、草本覆盖度为 25%的灌草配置方式有最好的减流减沙率,能最好地削减径流泥沙。研究结果可为北京褐土地区水土保持措施布设提供支撑。

关键词: 灌草配置方式; 模拟降雨; 产流产沙; 坡面侵蚀; 褐土

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2022)05-0017-07
DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2022.05.003

Effects of Different Configuration Patterns of Shrub and Grass on Runoff and Sediment Characteristics from Cinnamon Soil Under Rainfall Conditions

SHEN Ziya^{1,2}, CHENG Jinhua^{1,2}, ZHAO Wei³, GUAN Ning^{1,2},

ZENG Hezhou^{1,2}, QIN Jianmiao^{1,2}, ZHAO Mengyuan^{1,2}

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;
2.Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, State Forestry Administration, Beijing 100083; 3.Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088)

Abstract: In order to explore the effects of different configuration patterns of shrub and grass on soil erosion from cinnamon soil, a simulation rainfall experiments was conducted on cinnamon soil slopes planted with shrub (*Lespedeza bicolor Turcz.*) and the herbs (*Medicago sativa L.*). Three kinds of rainfall intensity (30, 60, 90 mm/h), three kinds of vegetation coverage (ratio of shrubs and herbs coverage was 1:2 (Ⅰ), 2:1 (Ⅱ), 1:1 (Ⅲ)) and three kinds of vegetation patterns (shrubs were located on up-slope (US), middle-slope (MS), low-slope (LS)) were designed to analysis the characters of runoff generation and sediment yield and the benefit of runoff and sediment reduction with the interaction between the vegetation coverage and vegetation patterns under rainfall conditions. The results showed that: (1) Runoff generation and sediment yield on slope increased greatly at the beginning of rainfall, and then the trend of increase gradually slowed down, and finally stabilized. When the shrubs were located at the low slope (LS) and the vegetation coverage was Ⅱ, the runoff generation and sediment yield were the least. (2) The relationship of the effect of runoff reduction and sediment reduction between different vegetation coverage was Ⅱ>Ⅰ>Ⅲ. The relationship of the effect of runoff reduction and sediment reduction between different vegetation patterns was LS>

MS>US. (3) A double factor variance analysis showed that vegetation coverage and vegetation patterns exhibited a significant effect on runoff generation and sediment yield ($p<0.05$), but the interaction between the vegetation coverage and vegetation patterns became insignificant on runoff generation and sediment yield. (4) When the shrubs at the low slope with 50% shrub cover and 25% herbs cover, this configuration pattern had the best runoff and sediment reduction efficiency. The results of the study could provide support for the deployment of soil and water conservation measures in cinnamon soil area of Beijing.

Keywords: distribution of shrub and herbs; simulated rainfall; runoff generation and sediment yield; slope erosion; cinnamon soil

水土流失已经严重影响到我国生态安全、防洪安全、粮食安全和饮水安全^[1]。我国华北土石山区以褐土为主,土层薄且透水性差,在降雨过后极易产生水土流失,生态环境恶化后难以恢复,已成为我国土壤侵蚀较为严重的区域^[2]。植被在治理水土流失中起到了重要的作用,植被冠层能有效减流减沙^[3],植被也能通过下垫面改变微地形从而影响径流泥沙^[4]。草灌植被具有良好的水土保持功能,朱永杰等^[5]研究表明,90%盖度的狗牙根草地能够有效削减降雨径流;也有研究^[6-7]表明,苜蓿和黑麦草草本覆盖在黄土高原地区可以减缓坡面径流、降低坡面产沙。草本植物能直接地保护地表土壤免受侵害。王青杵等^[8]研究发现,柠条、沙棘等灌木能有效控制水土流失,也有学者^[9]对灌木的产流产沙特征进行研究。

已有研究^[10-11]表明,植被覆盖度与径流率、侵蚀率呈现极显著相关关系。罗娅等^[12]研究发现,植被盖度对径流泥沙变化的影响比降雨强度更为明显。同时,植被空间配置方式也是影响坡面径流泥沙因素之一,植被种植在坡面不同空间位置上,会使土壤侵蚀强度发生变化^[13-15]。但多数学者只对单一因素进行讨论,并未明确植被覆盖度与植被空间配置方式交互作用下坡面径流泥沙的响应。且由于草本与灌木的植被基本属性不同,目前单独对草本^[16]或灌木的坡面产流产沙研究相对较多,而对于灌草组合形式下的研究并不常见。由于多层结构植被群落减少侵蚀强于单层植被^[9],定量研究灌草组合形式下的坡面径流泥沙特征十分必要。

基于此,本研究通过进行室内模拟降雨试验,在不同雨强、不同坡度条件下,分析不同灌草配置方式,即灌草覆盖度与灌草空间配置方式交互作用对褐土坡面径流泥沙特征的影响,分析不同灌草配置坡面产流产沙规律及特征,评估减流减沙效益,以揭示北京褐土区坡面水土流失过程及土壤侵蚀作用机理,为褐土区水土保持措施布设提供理论参考与技术依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

模拟降雨试验供试土壤取自北京市海淀区鹫峰

国家森林公园(40°03′37.2″N,116°04′32.8″E),海拔50~1 100 m,降水多集中在夏季,多年平均降水量630 mm。土壤类型为石灰性褐土,土壤质地为砂壤土,土壤容重为1.3 g/cm³,坡面坡度为5°~25°。公园内有灌木胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)、山葡萄(*Vitis amurensis* Rupr.)等,常见的草本有紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)、求米草(*Oplismenus undulatifolius* (Arduino) Beauv.)等。研究区内植物主要为人工林,灌木与草本错落分布。本次模拟降雨试验在北京交通运输部公路科学研究院降雨智能化模拟大厅内进行,降雨大厅采用下喷式降雨系统和降雨废水处理系统相结合,下喷式降雨区有效降雨高度8 m,可实现降雨雨强0.2~3.0 mm/min的连续变化过程。试验坡面系统采用可调节坡度的钢制土槽,土槽规格为3.0 m×0.75 m×0.5 m。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 试验于2021年8—9月进行,根据鹫峰森林公园多年气象资料记录的实际降雨情况,设计小雨强(30 mm/h)、中雨强(60 mm/h)、大雨强(90 mm/h) 3个降雨强度,降雨时长为30 min。根据对研究区坡度调查,以10°坡度作为试验坡度。选取胡枝子作为试验灌木,紫花苜蓿作为试验草本,并根据灌草在坡面分布的差异性,设置不同灌草配置方式,其中灌草配置方式包括灌木与草本在不同覆盖度及空间配置方式下的交互作用。根据胡枝子和紫花苜蓿覆盖度的不同配比(1:2,2:1,1:1)设置不同灌草覆盖度,以及在灌木种植于不同坡位[坡上(US)、坡中(MS)、坡下(LS)]设置不同灌草空间配置,同时设置裸坡作为对照,具体灌草配置方式见图1。

1.2.2 试验步骤 土槽装填前,将运回土壤自然风干并过直径为10 mm的筛孔,除去植物根系和石块等杂物。采取分层填土、分层压实方法进行填土,填土高度为40 cm,每10 cm为1层,设置土壤容重为1.3 g/cm³。底部10 cm铺上天然细沙,铺1层透水纱布后,上填30 cm过筛土壤。每层填土后将表层土壤进行粗糙度处理。提前进行草本撒种以及灌木移

植,并在试验前进行多次浇水以保证植被存活率。

每次降雨前测定土壤含水量,保证试验前土壤含水量基本一致,且保证坡面不产流。开始降雨后,记录开始产流时间。开始产流后前 10 min 每 1 min 进

行采样,后面每 2 min 进行采样,采用全部收集法。开始产流 30 min 后停止降雨。收集后静置 24 h,测定产流量,用烘干法测定产沙量。为了确保试验精确性,对每次降雨试验重复 2 次。

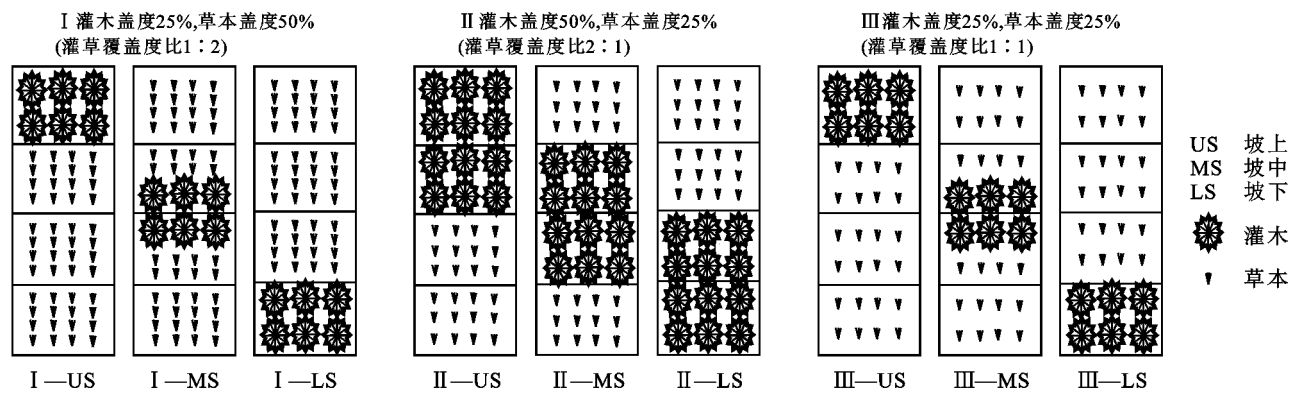


图1 灌草配置方式示意

减沙率、减流率计算公式为:

$$BRS = \frac{S_L - S_V}{S_L} \times 100\% \quad (1)$$

$$BRR = \frac{R_L - R_V}{R_L} \times 100\% \quad (2)$$

式中: BRS 为减沙率(%); S_L 为裸坡的产沙总量(g); S_V 为灌草配置下的产沙总量(g); BRR 为减流率(%); R_L 为裸坡的产流总量(mL); R_V 为灌草配置下的产流总量(mL)。

1.3 数据处理

试验数据采用 Excel 2017 软件进行整合计算,采用 SPSS 25.0 软件进行数据统计分析,并用 Origin 2021 软件进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 不同灌草配置方式下褐土坡面的产流产沙过程

由图 2 可知,不同灌草配置方式坡面的产流过程有着基本相同的变化趋势,即在降雨初始阶段,产流产沙量大幅度增加,随后增加趋势逐渐减缓,最后趋于稳定。随着降雨强度增大,产流越快趋于平稳状态。灌草配置方式为 II—LS 的产流量明显低于其他灌草配置方式,而灌草配置方式为 III—US 的产流量高于其他配置方式。当降雨强度为 30 mm/h 时,II—LS 稳定产流量在 600 mL,III—US 稳定产流量在 1 300 mL,约为 II—LS 的 2.1 倍。降雨强度为 60, 90 mm/h 时,III—US 稳定产流量在 1 800, 2 400 mL,分别为 II—LS 稳定产流量的 1.8, 1.7 倍。这说明在小雨强下,坡面流速相对较小,径流在坡面上的时间更长,使得径流入渗作用加强,导致坡面产流量随灌草配置方式的不同而变化,而在大雨强下,这种作用却有所减弱。在降雨强度相同的条件下,随着灌草空间配置从坡上到坡下,稳定产流量呈减小趋势,不同灌草空间配置产流量大小表现为 US >

MS > LS, 且灌草配置方式为 LS 的坡面更快达到稳定产流。不同灌草覆盖度产流量在相同降雨条件下大小均表现为 III > I > II, 灌草覆盖度越大,产流量越小。

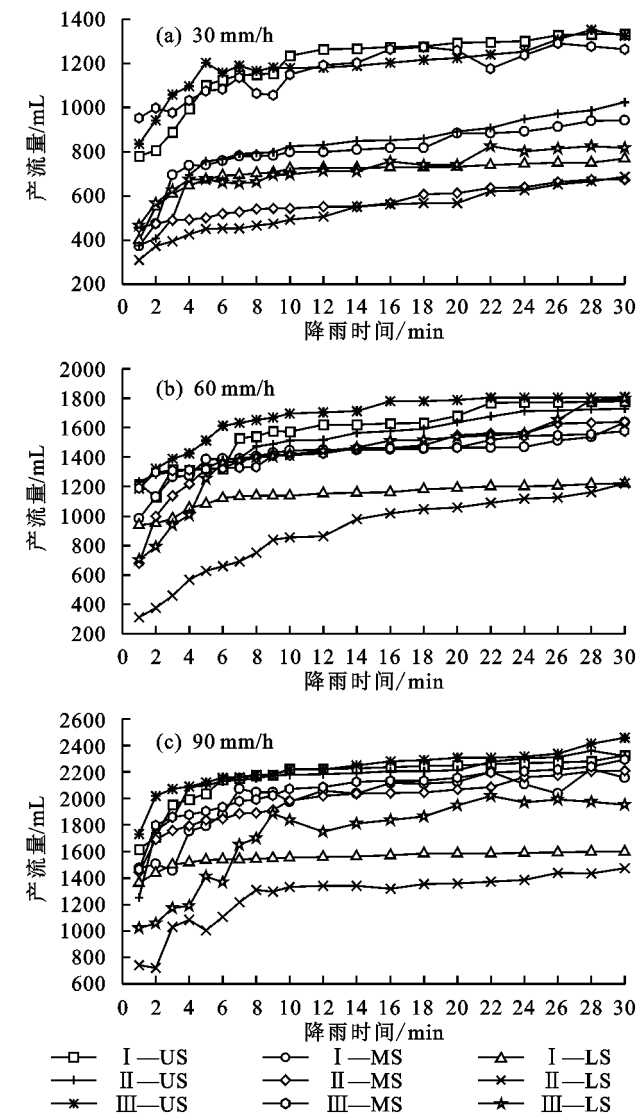


图2 不同灌草配置方式下坡面产流过程

由图 3 可知,不同灌草配置方式的产沙过程趋势与产流过程相似,即在降雨初期产沙量快速增加,后平稳小幅度增加,坡面产沙量明显受灌草配置方式影响。随着雨强增大,坡面产沙量越多。灌草空间配置为 LS 的产沙量明显低于其他空间配置产沙量,且产沙量增加幅度不高,产沙过程较为稳定。而灌草空间配置为 US 的产沙量最多,且在降雨初期产沙量增加幅度更大,达到平稳产沙量所需降雨时间更长。在灌草空间配置及降雨强度相同时,随着植被覆盖度增大,坡面产沙量减小,且灌木削减坡面产沙的效果比草本更佳,其产沙量大小规律为Ⅲ>Ⅰ>Ⅱ。其中Ⅱ—LS 的产沙量最低,在 30,60,90 mm/h 雨强下,降雨后期Ⅱ—LS 平稳产沙量分别为 0.4,0.8,3.3 g,产沙量最大的配置方式Ⅲ—US 平稳产沙量分别为Ⅱ—LS 的 4.0,4.4,5.7 倍。

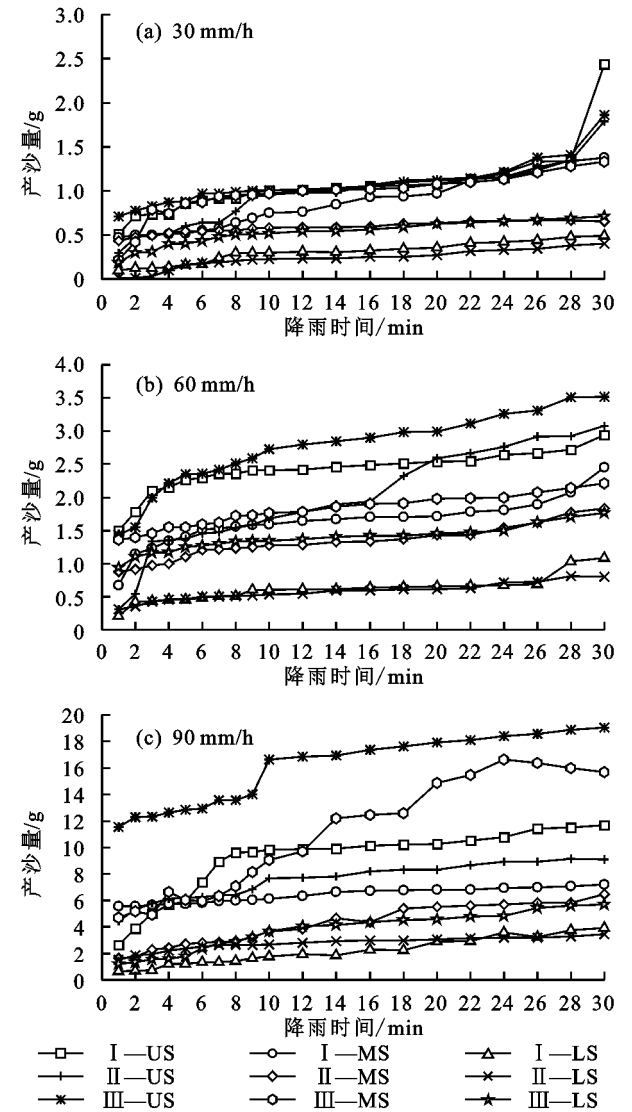


图 3 不同灌草配置方式下坡面产沙过程

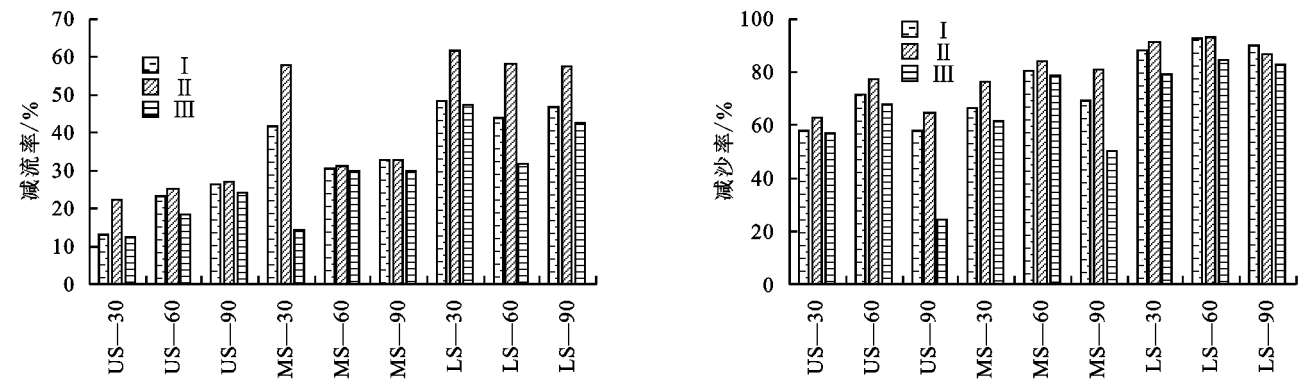
2.2 不同灌草配置方式对褐土坡面减流减沙率的影响

由图 4 可知,不同灌草配置方式条件下坡面减流率为 12.27%~61.58%,灌草覆盖对北京地区褐土坡

面发挥一定减流作用。当降雨强度为 30 mm/h 且灌草覆盖度为Ⅱ时,灌草空间配置为 LS、MS、US 的减流率分别为 61.58%,57.96%,22.29%。在灌草覆盖度相同时,不同灌草空间配置的减流率大小关系为 LS>MS>US。灌丛位于坡下时的减流率约为坡上的 3 倍,说明当灌丛位于坡下时,能够最好地减少径流。在灌草空间配置相同条件下,不同灌草覆盖度的减流率大小关系表现为Ⅱ>Ⅰ>Ⅲ,且灌草覆盖度变化对坡面减流率的作用在小雨强条件下更加明显。这说明增加灌草覆盖度,能有效减少坡面径流。

灌草坡面减沙率为 24.50%~93.27%。在不同雨强条件下,灌草坡面减沙率大小依次为 60 mm/h>30 mm/h>90 mm/h,这说明 30~60 mm/h 降雨强度范围内存在 1 个临界降雨强度使得减沙率达到最大。不同灌草空间配置下,灌丛位于坡上到坡下的减沙率逐渐递增,这与减流率的大小规律相同,但灌草位于坡下时的减沙率约为坡上时的 1.5 倍。说明灌丛位于坡下的灌草空间配置方式对径流泥沙削减的效果最好,灌草空间配置对坡面减流率影响比减沙率更明显。在不同灌草覆盖度条件下,灌草坡面减沙率大小变化规律为Ⅱ>Ⅰ>Ⅲ。在灌丛位于坡下,雨强为 90 mm/h 时,Ⅱ的减沙率略小于Ⅰ,原因可能为大雨强使灌木冠层无法起到较高的截留作用,反而增加雨滴击溅,使泥沙侵蚀加重。

坡面的减流减沙率常作为坡面减流减沙效益的指标之一,为进一步探究不同灌草配置方式的减流减沙效益特征,对不同灌草配置方式减流减沙率均值进行显著性分析。由表 1 可知,在同一灌草覆盖度条件下,不同灌草空间配置的减流率及减沙率具有显著差异($p<0.05$),其中 LS 的减流率及减沙率显著高于 US、MS 空间配置方式,减流率最大相差 34.30%,减沙率最大相差 31.54%。这说明在坡面布设灌草能够有效降低降雨过程中的水土流失现象,灌丛位于坡下的空间配置方式减流减沙效果最佳。而在同一灌草空间配置条件下,不同灌草覆盖度的减流率和减沙率具有差异性,其中Ⅲ显著差异于Ⅰ、Ⅱ,减流率及减沙率最小。当灌草空间配置为 US 时,覆盖度Ⅱ坡面减流率均值为 24.87%,比覆盖度Ⅰ减流率均值高 3.97%,比覆盖度Ⅲ减流率均值高 6.59%。其他条件下覆盖度Ⅱ的减流率和减沙率均值也为最高。这表明增加灌木及草本覆盖率均能有效减少径流泥沙,且灌木截流拦沙效率比草本更佳。以上表明,当灌丛位于坡下、灌丛覆盖度为 50% 及草本覆盖度为 25%,这种灌草配置方式有最好的减流减沙效益,这也与前面的结论相同。



注:US—30 指在 US 空间配置方式及 30 mm/h 雨强条件下的减流率,其他同理。

图 4 不同灌草配置方式下坡面减流减沙率

表 1 不同灌草配置下减流减沙率均值特征

指标	灌草 覆盖度	US	MS	LS
减流率/%	I	20.90±7.12Dd	34.99±5.96Cb	46.47±2.29Ba
	II	24.87±2.45Cc	40.69±14.98Bb	59.17±2.10Aa
	III	18.28±5.96Dd	24.74±9.03Cc	40.57±7.92Bb
减沙率/%	I	62.29±7.86Dc	72.24±7.50Bb	90.40±2.30Aa
	II	68.29±7.96Cd	80.56±3.94Bb	90.48±3.22Aa
	III	49.73±22.54Ee	63.48±14.30Cd	82.27±2.77Bb

注:表中数据为平均值±标准差;不同大写字母表示同一灌草覆盖度、不同灌草空间配置指标差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示同一灌草空间配置、不同灌草覆盖度指标差异显著($p<0.05$)。

2.3 不同灌草配置方式对坡面产流产沙贡献分析

由于灌草覆盖度及灌草空间配置交互作用对坡

表 2 基于方差分析的灌草配置方式对坡面产流产沙影响的显著性和贡献率

指标	差异源	平方和	自由度	均方和	F	P	因子贡献率/%
总产流量	覆盖度	136334000	2	68167100	3.603	0.042 *	13.48
	空间配置	481222000	2	240611000	3.650	0.040 *	47.84
	交互	16490700	4	4122667.466	0.036	0.997	6.34
	误差	2036460000	18	113137000			32.35
	覆盖度	8049.59651	2	4024.798	3.664	0.040 *	14.41
总产沙量	空间配置	19924.54467	2	9962.272	3.643	0.040 *	40.08
	交互	2097.86413	4	524.466	0.087	0.986	8.32
	误差	109109.6726	18	6061.648			37.18

注: * 表示 $p<0.05$ 。

3 讨论

坡面是侵蚀发生的基本单元^[17],学者往往从坡面开始对侵蚀过程进行研究。已有研究^[12,18-20]表明,降雨强度、坡度、植被覆盖度及植被格局对坡面产流产沙过程有一定影响。而不同的灌草配置方式,使得坡面形态发生变化,从而影响坡面产流产沙过程及坡面减流减沙率。

植被覆盖度是影响坡面产流产沙的主要因素之

面水土流失的影响十分复杂,因此对不同灌草配置方式产流产沙量进行方差分析,研究灌草覆盖度及灌草空间配置对坡面总产流产沙量的显著性和贡献率。由表 2 可知,灌草覆盖度和灌草空间配置对总产流量和总产沙量均有显著性影响($p<0.05$),但是灌草配置方式,即灌草覆盖度和灌草空间配置交互作用对坡面总产流量和总产沙量的作用并不显著。对于贡献率而言,灌草覆盖度对总产流、产沙量的因子贡献率分别为 13.48%和 14.41%;灌草空间配置对总产流、产沙量的因子贡献率分别为 47.84%和 40.08%;灌草配置方式对总产流、产沙量的因子贡献率分别为 6.34%和 8.32%。这表明灌草空间配置方式对坡面产流产沙的作用仍然起着主导作用,灌草覆盖度对坡面产流产沙也能起到一定影响作用,两者交互作用对坡面总产流产沙量的贡献率最低,影响很小。

一。本试验发现,随着灌木、草本的覆盖度增加,坡面产流产沙量减少、减流减沙率增加,且灌木比草本更能有效拦截雨水减少径流泥沙,其中灌草覆盖度为灌丛覆盖度 50%+草本覆盖度 25%的坡面产流产沙量最少。其原因可能是灌草植被对降雨有一定截留作用,灌草冠层截留降雨起到很大作用。在雨滴到达坡面之前,坡面的灌草冠层截留作用削弱降雨能量,使雨滴动能减弱,雨滴达到坡面时已小于实际雨强^[18]。

由于植物冠层截留体积与冠层覆盖面积、植物冠层截留量呈正相关关系^[21],冠层覆盖面积越大,植物截留量更大,灌草对坡面径流拦截作用增强,从而使产流产沙量降低。灌木相对于草本有更大的冠层覆盖面积,能更有效拦蓄雨水起到水土保持作用;另一方面,随着灌草覆盖度增加,坡面的径流流速因灌草阻拦而降低,土壤入渗作用有所增加,从而减少坡面产流量。同时灌草根系固结土壤提升土壤抗冲能力,使得坡面产沙量有所降低。当灌草配置方式相同时,随着降雨强度的增大,灌草坡面的减流率呈减小趋势,这与朱永杰等^[5]研究随着降雨强度增大草地径流总量的削减率总体上减小的结论相同。

植被的配置方式使坡面产流产沙量和减流减沙效益产生显著差异,宇涛等^[22]研究表明,植被布设于坡面下部时,植被调控侵蚀发育的作用得以体现,这与本研究的结果相同。本试验通过模拟不同灌草配置方式在降雨条件下的减流减沙率发现,减流率、减沙率由大到小植被空间配置依次为坡下>坡中>坡上。而程圣东等^[23]则认为,并非将草带布设在坡面最底端其水土保持效果最佳,其原因可能是研究坡面结构的不同从而导致试验结果的差异。程圣东等^[23]研究对象为有特殊结构的坡沟系统,在坡面中部坡度有一定转变,使得经过底端植被的水流挟沙力大,陡坡带来的较大径流落差使得坡面侵蚀增大。而本试验在坡度一定的坡面上试验,一方面径流动能被灌草削减,在模拟降雨条件下坡面由上往下汇流逐渐增多,灌草主要拦截上方径流,这样径流大部分动能在坡面流动过程中已经被草被削减,从而减少了侵蚀量;另一方面,植被主要对上方来水中的泥沙进行阻拦,灌丛位于坡上时径流含沙量较少,无法发挥高效的减沙作用,当灌丛位于坡下时,由于降雨在坡面上方产生部分侵蚀带来含沙量较大的径流,使得灌草在坡下取得更大拦蓄作用,从而减少产沙量。所以当灌木位于坡下时拦水拦沙率相对较高,减流减沙效果更佳^[24]。

已有研究^[25]表明,灌丛与草本的垂直复合结构对坡面径流泥沙特征有显著影响,但通常忽略灌草覆盖度及灌草空间配置方式交互作用对坡面径流泥沙特征的影响,本研究对灌草覆盖度和灌草空间配置进行多因素方差分析得到灌草覆盖度和灌草空间配置对总产流量和总产沙量均有显著性影响($p<0.05$),但是灌草配置方式,即灌草覆盖度和灌草空间配置交互作用对坡面总产流量和总产沙量的作用并不显著,这与邓景成^[26]的研究结果相同。张志旭^[27]基于 WEPP 模型经过对比发现,坡下 1/3 面积种植紫花

苜蓿,坡上 2/3 面积种植自然荒草具有较好的综合效益,这与本研究结果相似。本研究发现,灌丛于坡下,灌丛覆盖度为 50%,草本覆盖度为 25%,有更好的减流减沙效益。本试验定量研究降雨条件下植被配置方式的坡面径流泥沙特征,分析不同灌草配置坡面产流产沙规律及特征,评估减流减沙效益,可揭示北京褐土区坡面水土流失过程及土壤侵蚀作用机理,为褐土区水土保持措施布设提供理论参考与技术支持。

4 结论

(1)在坡面种植灌草有助于减少土壤侵蚀发生,在室内人工模拟降雨试验中,随着降雨强度增大,坡面累积产流产沙量增大。坡面产流产沙量在降雨初期大幅度增加,随后增加趋势逐渐减缓,最后趋于稳定。坡面在不同灌草覆盖度条件下产流产沙量大小关系为Ⅲ>Ⅰ>Ⅱ,在不同灌草空间配置方式下产流产沙量大小关系为 US>MS>LS,灌草配置方式为Ⅱ—LS 的产流产沙量显著低于其他灌草配置方式。

(2)通过与裸地产流产沙量的对比与计算,随着雨强增大,灌草坡面的减流率呈减小的趋势,但减沙率规律为 60 mm/h>30 mm/h>90 mm/h。不同灌草覆盖率减流减沙率大小关系为Ⅱ>Ⅰ>Ⅲ,不同灌草空间配置减流减沙率大小关系为 LS>MS>US。灌草坡面最大减流率可达到 61.58%,最大减沙率可达到 93.27%。

(3)对不同灌草配置的减流减沙率均值进行显著性分析,不同灌草配置方式间的减流率及减沙率具有显著差异,灌丛位于坡下(LS)的空间配置方式及灌草覆盖度为Ⅱ的减流减沙效果更佳,最大减流率均值可达 59.17%,最大减沙率均值可达 90.48%。增加灌木及草本覆盖率均能有效减少径流泥沙,且灌木截流拦沙效率比草本更佳。

(4)灌草覆盖度和灌草空间配置对总产流量和总产沙量均有显著性影响($p<0.05$),但灌草覆盖度和灌草空间配置交互作用对坡面总产流量和总产沙量的作用并不显著。灌草配置方式为灌丛于坡下,灌丛覆盖度为 50%,草本覆盖度为 25%,此配置方式能起到最好的水土保持作用,为褐土区水土保持措施布设提供有效的理论支撑。

参考文献:

- [1] 赵其国,黄国勤,马艳芹.中国生态环境状况与生态文明建设[J].生态学报,2016,36(19):6328-6335.
- [2] 程金花,秦越,张洪江,等.华北土石山区模拟降雨下土壤溅蚀研究[J].农业机械学报,2015,46(2):153-161.
- [3] Zhao C H, Gao J E, Huang Y E, et al. The contribu-

- tion of astragalus adsurgens roots and canopy to water erosion control in the water-wind crisscrossed erosion region of the Loess Plateau, China [J].Land Degradation and Development,2017,28(1):265-273.
- [4] 肖培青,姚文艺,申震洲,等.苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J].水利学报,2011,42(2):232-237.
- [5] 朱永杰,毕华兴,常译方,等.90%盖度狗牙根草地对次降雨径流削减作用[J].北京林业大学学报,2015,37(10):103-109.
- [6] 李智勇,张梦杰,陈明玉,等.苜蓿对坡面产流产沙及土壤水分的影响[J].水土保持研究,2021,28(5):54-60.
- [7] 焦若禺,宋孝玉,赵新凯,等.黄土沟壑区黑麦草植被冠层与根系坡面水沙效益及水力特性[J].干旱区地理,2022,45(1):208-218.
- [8] 王青杵,王改玲,石生新,等.晋北黄土丘陵区不同人工植被对水土流失和土壤水分含量的影响[J].水土保持学报,2012,26(2):71-74,79.
- [9] 肖培青,姚文艺,王昌高.灌木减流减沙效应及其水力学机理试验研究[J].泥沙研究,2012,37(5):33-37.
- [10] 朱高立,黄炎和,林金石,等.模拟降雨条件下秸秆覆盖对崩积体侵蚀产流产沙的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):27-31,37.
- [11] 常松涛,黄少燕,查轩,等.雨强和植被覆盖度对红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):58-63.
- [12] 罗娅,杨胜天,刘晓燕,等.黄土高原次降雨径流产沙变化及其与雨强和植被盖度变化的相关性[J].干旱区研究,2015,32(4):698-709.
- [13] 陈鹏,张铁钢,董智,等.灌草格局对砒砂岩区产流产沙特征的影响[J].干旱区资源与环境,2020,34(9):116-121.
- [14] 苏远逸,李鹏,李占斌,等.坡面植被格局对坡沟系统能量调控及水沙响应关系的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):32-39.
- [15] 秦伟,曹文洪,郭乾坤,等.植被格局对侵蚀产沙影响的研究评述[J].生态学报,2017,37(14):4905-4912.
- [16] 王志刚,杨海龙,刘慧博,等.河岸边坡草被减流减沙效应及其坡面流水动力学特征[J].水土保持学报,2016,30(2):8-13.
- [17] 贾莲莲.模拟降雨条件下黄土坡面侵蚀过程与调控试验研究[D].西安:西安理工大学,2010.
- [18] 陈科兵,吴发启,姚冲.黄土高原南部地区人工模拟暴雨条件下不同坡度谷子坡耕地产流产沙过程[J].水土保持学报,2021,35(3):90-95,103.
- [19] 杨青,杨广斌,赵青松,等.喀斯特地区不同降雨和植被覆盖的坡面产流产沙特征[J].水土保持通报,2020,40(1):9-16.
- [20] 王恒星,张建军,孙若修,等.晋西黄土区不同植被格局坡面产流产沙特征[J].北京林业大学学报,2021,43(3):85-95.
- [21] 王思思,龙佳,丁涵.北京市 21 种植物的叶片吸水性能与冠层雨水截留能力研究[J].北京林业大学学报,2020,42(9):100-110.
- [22] 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):22-27,122.
- [23] 程圣东,李鹏,李聪,等.降雨—植被格局耦合作用对坡沟系统水沙特征影响[J].应用基础与工程科学学报,2016,24(2):230-241.
- [24] 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.
- [25] 梁方晖,赵凌平,谭世图,等.灌草立体配置对退化草地土壤水分和养分的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(12):18-25.
- [26] 邓景成.灌草植被盖度对产流产沙影响的模拟降雨实验研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [27] 张志旭.黄土高原沟壑区草地植被减流减沙优化格局研究[D].西安:西安理工大学,2021.