

不同植被空间配置下的坡面产沙及泥沙连通性变化特征

边 焄, 朱冰冰, 黎 珩, 闫帅旗

(陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119)

摘要: 植被是影响土壤侵蚀的重要因子, 探讨坡面产沙和泥沙连通性对植被分布的响应对揭示土壤侵蚀过程机理及预测坡面侵蚀具有重要意义。通过室内人工放水冲刷试验, 分析 3 种植被布设位置(坡上、坡中、坡下)在不同冲刷流量(3.2, 5.2 L/min)和不同覆盖度(0, 30%, 50%, 70%)下的减沙效益, 结合坡面产沙潜力指数探究植被覆盖影响下的泥沙连通性变化特征。结果表明: (1) 从不同盖度下的平均减沙效益及其稳定性来看, 植被布局的减沙效益随盖度变化, 且坡下植被空间分布最优。随冲刷流量增加, 不同植被布局间的减沙效益差距缩小; (2) 当植被盖度 $\leq 30\%$ 时, 冲刷流量对坡面产沙的影响贡献较大; 随盖度增加, 植被的影响贡献程度大于冲刷流量, 成为影响坡面侵蚀的主要因素; (3) 坡面产沙潜力指数在不同植被盖度和分布位置下表现出明显差异。随盖度增加, 产沙潜力指数减小, 泥沙连通性减弱; 坡下布设植被相比坡上和坡中产沙潜力指数最小, 泥沙连通性最弱。该指数与产沙量之间存在显著的正相关关系, 即产沙潜力越大, 泥沙连通性越强, 产沙量越大。研究结果可为深入探索土壤侵蚀机理及植被的生态效益提供科学依据, 为黄土高原地区的生态建设提供参考。

关键词: 坡面; 植被; 土壤侵蚀; 泥沙连通性; 产沙潜力指数

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)02-0045-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.02.006

Variation Characteristics of Slope Sediment Yield and Sediment Connectivity Under Different Vegetation Spatial Distributions

BIAN He, ZHU Bingbing, LI Heng, YAN Shuaiqi

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119)

Abstract: Vegetation is an important factor affecting slope soil erosion process, thus exploring the response of slope sediment yield and sediment connectivity to vegetation spatial distribution is of great significance to reveal the mechanism of soil erosion process and predict slope erosion. In this study, based on the indoor scouring experiment, the sediment reduction efficiency of three common slope vegetation distributions (upper slope, middle slope, lower slope) under different flow discharge (3.2 and 5.2 L/min) and vegetation cover (0, 30%, 50% and 70%) were analyzed. And a sediment connectivity index (the index of potential sediment yield) was used to explore the characteristics of sediment connectivity influenced by vegetation. The results showed that: (1) The sediment reduction efficiency of vegetation distribution varied with the coverage. According to the average and variable amplitude of sediment reduction efficiency, the effect of vegetation distribution on the lower slope was best compared with other vegetation distribution. However, its gap in different vegetation distribution was reduced with the increase of the flow discharge. (2) The effects of flow discharge on sediment yields were slightly greater than that of vegetation when the vegetation cover was smaller ($\leq 30\%$). But the role of vegetation enhanced gradually and became the dominant influencing factor with the increase of vegetation cover. (3) The index of potential sediment yield was significantly different under varied vegetation cover and distribution. As the vegetation cover increased, the index decreased and the sediment connectivity weakened. And the index of vegetation distribution on the lower slope was smallest and

收稿日期: 2022-08-05

资助项目: 陕西省重点研发计划项目“沙漠—黄土过渡带植被结构特征阈值与提质增效关键技术研究”(2021ZDLSF05-02); 国家自然科学基金项目“黄土区退耕坡面植被恢复对坡沟系统侵蚀产沙的阻控研究”(41601285)

第一作者: 边焄(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土流失与植被恢复的生态效益研究。E-mail: 861309005@qq.com

通信作者: 朱冰冰(1980—), 女, 副教授, 主要从事植被恢复与水土保持研究。E-mail: zbb1026@126.com

its sediment connectivity was worst compared with that on the upper or middle slope. In addition, there was significant positive correlation between the index of potential sediment yield and sediment yields, that is, the greater potential of sediment yield meant the stronger sediment connectivity and thus the greater sediment yields. The results can provide scientific basis for the exploration of soil erosion mechanism and ecological benefits of vegetation, and further provide reference for ecological construction in the Loess Plateau.

Keywords: slope; vegetation; soil erosion; sediment connectivity; the index of potential sediment yield

黄土高原位于黄河中游地区,在黄河流域“一廊五区”生态空间格局中处于极为重要的地位^[1]。经过多年的植被恢复与重建,该地区的生态环境有所好转,但由于水资源的有限性,植被无法达到完全覆盖,只有通过优化现有的分布格局才能更好发挥植被的蓄水保土作用^[2]。研究^[3]表明,植被布设于坡面下部时相比坡上减沙量平均增加 2.8 倍;条纹状和线状灌木地的镶嵌格局与点状镶嵌格局相比截流能力高 8%^[4];均一化植被格局相比植被与裸地斑块镶嵌分布的植被格局产流产沙量小^[5]。可见,植被分布方式与侵蚀产沙变化具有密切关系^[6-8]。然而,由于土壤侵蚀过程的复杂性,导致现有研究^[9-10]多停留在对植被分布与侵蚀产沙量的逻辑关系分析,对不同植被布局影响下的侵蚀产沙过程缺乏深入探讨。

近年来,泥沙连通性作为量化坡面侵蚀过程的重要指标受到广泛重视。Mayor 等^[11]基于“源”“汇”理论,提出水流路径长度(flow length),用以反映径流在植被斑块与裸地斑块之间的连通程度,并发现水流路径长度越长,径流连通性越强,侵蚀能力和泥沙输移能力越强。Ludwig 等^[12]提出的方向性渗透指数(DLI)表征水沙在源汇间的连通性,反映坡面植被覆盖阻滞水土的能力,并发现该指数与坡面产沙量呈指数函数关系^[13]。此后,国内学者^[14-15]不断对相关连通性指数进行完善,并展开运用。上述研究虽强调了水沙的流动过程,但忽视了植被斑块与裸地斑块在影响土壤分离和泥沙输移方面的差异。为此,本文采用人工放水冲刷方式,通过设置不同冲刷流量和植被盖度探究不同植被布局方式下的坡面侵蚀变化特征,并提出产沙潜力指数,量化坡面的土壤分离和泥沙输移过程,以探索植被布设对坡面泥沙连通性的影响及其作用机理,以期为坡面土壤侵蚀过程的研究提供新思路,并为区域水土流失的综合治理提供材料。

1 材料与方法

1.1 试验设计

采用室内人工放水冲刷方式,依据黄土高原暴雨发生频率^[16],冲刷流量设置为 3.2,5.2 L/min。试验土槽由砖和混凝土制成,长 5 m,宽 2 m,坡度为 20°,其中顶部 0~1 m 为放水过渡区,并用 PVC 板分割成 4 个径流小区,以供试验需要。试验用土为粉(砂)

壤土,黏粒($<0.002\text{ mm}$)、粉粒($0.002\sim0.05\text{ mm}$)和砂粒($>0.05\text{ mm}$)分别占总量的 12.1%,51.4%和 36.5%,土壤容重为 1.30 g/cm^3 。为模拟自然土层的透水性,先在土槽底部填充 10 cm 细沙,其他土层采用分层填充的方式,每层 10 cm。根据土壤含水量,计算出每层填土的质量,在土壤装填后,进行压实,控制容重约 1.30 g/cm^3 ,并对表层进行打毛,减小分层的影响。为探究不同植被覆盖位置下的坡面侵蚀变化特征,在完成整个坡面 20 cm 土层的填充后,在平坦地块(土壤处理与坡面保持一致)培育的成熟试验用草(野牛草)带土 20 cm 分别铺设至相应位置以形成 3 种布局方式(坡上、坡中和坡下分布)。同时,考虑植被在不同坡位分布时覆盖程度的影响,将草被铺设长度依次设为 1.2,2.0,2.8 m 以表征不同覆盖度(30%,50%和 70%),具体草被配置方式见图 1。其余部分按控制容重继续分层填土至坡面平整,坡面土层总厚度为 40 cm,设置裸坡作为对照。为保证试验数据的可靠性,重复 2 次试验,共计 40 场次。

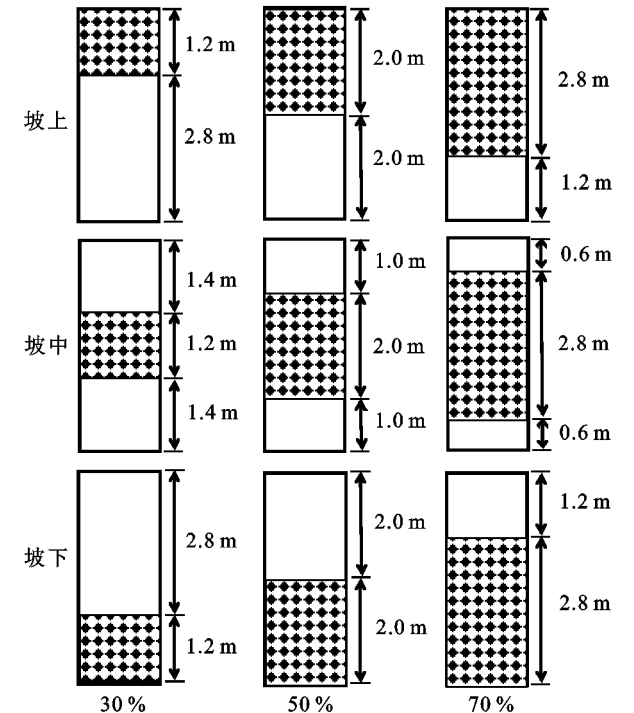


图 1 草被空间配置示意

试验开始前,在供水桶上部安装溢流口,并保证水桶水位稳定,实现充分供水,率定流量。试验开始后,记录初始产流时间,从产流开始计时,历时 20 min,每隔 1

min 收集 1 次径流泥沙样,用于测量径流量和烘干的泥沙质量。采用染色剂法(KMnO_4)测定设在距坡顶 1,2,3,4 m 处的断面流速,测量 3 次,取其平均值,乘以修正系数 0.67,得到坡面平均流速^[17]。

1.2 坡面产沙潜力指数计算

泥沙连通的发生主要通过水流对土壤的剥蚀和泥沙从源到汇的搬运 2 个环节来实现,为尝试量化植被覆盖坡面的土壤分离和泥沙输移过程,本文提出产沙潜力指数概念。具体计算为:

(1)借鉴曹梓豪等^[18]和闫帅旗等^[6]计算连通性指数的相关原理和方法,根据坡面的实际情况,将 4 m×0.5 m 的坡面平均划分为 200 个 0.1 m×0.1 m 的单元格。依据坡面表层植被分布状况,将单元格划分为裸地斑块和植被斑块两类。

(2)在不同冲刷流量下,通过裸地坡面的产沙量值及裸地斑块数量,计算出单个裸地斑块的平均产沙量值;再根据植被覆盖坡面的产沙量和相应斑块数量,计算出不同植被布设方式下单个植被斑块的平均产沙量值。假设裸地斑块的产沙能力为单位 1,将单个植被斑块与裸地斑块平均产沙量的比值,作为植被斑块相对于裸地斑块的产沙能力单位值,以此衡量两者产沙能力的相对关系。

(3)在不同冲刷流量下,将裸地斑块的输沙能力假设为单位 1;以不同盖度下坡面流平均流速与裸地坡面流速的比值量化不同植被布局方式下的坡面输沙能力^[19],再根据坡面植被斑块数量,求出单个植被斑块相对于裸地斑块的输沙能力单位值($T=X^Y$ 。式中: T 为坡面输沙能力; X 为单一植被斑块的输沙能力; Y 为植被斑块数量),以此衡量两者输沙能力的相对关系。

(4)依据单一流向算法^[6],将坡顶首个单元格的产沙能力值与输沙能力值相乘,作为该单元格所侵蚀的泥沙输移至下一单元格的相对产沙潜力值。该值与下一单元格的产沙能力值相加再乘以相应的输沙能力值,表示水沙流动至此处时的相对产沙潜力值;以此类推,求出径流小区中水沙从坡顶各列第 1 个单元格流动到坡底最后 1 个单元格的相对能力值,取其平均值,作为该坡面的产沙潜力指数。如一系列有 3 个单元格,其中前 2 个为裸地斑块,后 1 个为植被斑块。假设裸地和植被斑块的产沙能力分别为 X_1 和 X_2 ,输沙能力分别为 Y_1 和 Y_2 ,则此列的产沙潜力指数计算公式为 $[(X_1 * Y_1 + X_1) * Y_1 + X_2] * Y_2$ 。

2 结果与分析

2.1 不同空间布设下植被的减沙效益

从图 2 可以看出,坡下植被布局相比坡上和坡中减沙效益最好,这主要是因为布设在坡下的植被对

坡面上中部的的水沙进行集中拦截,而坡上植被对坡面中下部没有起到明显的保护作用,覆盖在坡中的植被仅拦截坡面上中部的产沙,对坡面下部侵蚀难以起到一定的抑制作用。随冲刷流量的增加,植被减沙效益整体增大,但不同分布位置下的减沙效益差距缩小。当冲刷流量为 3.2 L/min 时,坡下植被的减沙效益相比坡上和坡中最大增加 6%;而冲刷流量提高至 5.2 L/min 时,与坡上和坡中植被相比,坡下植被的减沙效益仅增加 2%。可见,植被空间分布对坡面侵蚀的影响程度在大冲刷流量下有所减弱,因此在生态建设布设植被时,考虑当地的降雨强度是有必要的。

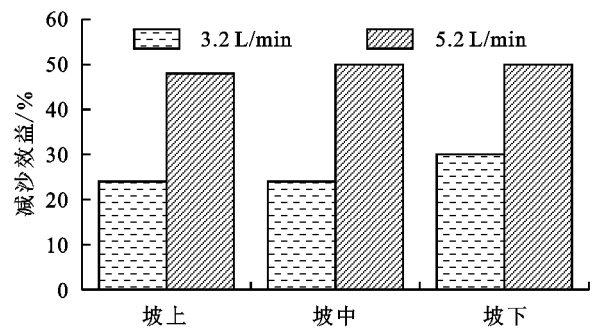


图 2 不同空间布设下植被减沙效益的变化

由图 3 可知,植被盖度显著影响覆盖位置与坡面减沙效益的相对关系。总体上,在一定盖度范围内,植被减沙效益随盖度增加而增强,各分布位置在大盖度下的减沙效益远大于小盖度的对应值。具体地,30% 盖度时,坡下植被减沙效益最好,其次为坡上植被,最后为坡中植被;盖度为 50% 时,坡中、坡下和坡上植被减沙效益依次递减;而盖度提高至 70% 时,减沙效益则表现为坡上>坡中>坡下。可见,植被空间配置对坡面侵蚀的影响程度在不同盖度下表现不同,因此在确定植被空间分布时,需要综合考虑当地可承载的植被覆盖程度。此外,各覆盖位置下的减沙效益差异随盖度的增加而不断缩小。坡下植被的减沙效益在不同盖度间波动幅度最小,表现出较强的稳定性,且从不同盖度的平均减沙效益来看,坡下布设植被最优。

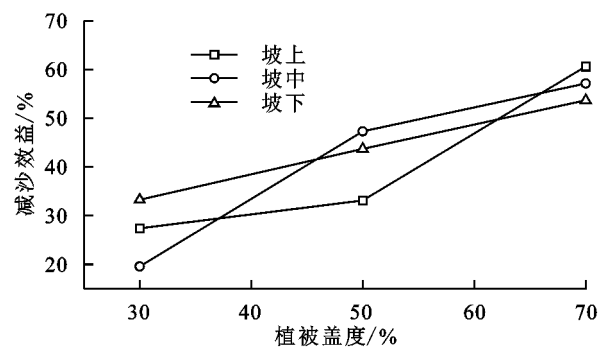


图 3 不同空间布设下植被减沙效益随盖度的变化

2.2 坡面产沙潜力指数变化特征

2.2.1 不同植被盖度下产沙潜力指数的变化特征
坡面产沙潜力指数与植被盖度之间存在显著的线性关

系,且产沙潜力指数随盖度增加呈下降趋势(图 4)。与裸地相比,植被覆盖下的产沙潜力指数平均下降 56%。其原因在于植被的分布可保护地表,增强土壤抗蚀性;并且减弱水流动能,降低水沙搬运的能力。通过不同冲刷流量对比发现,3.2 L/min 冲刷流量的产沙潜力指数大于 5.2 L/min 冲刷流量的对应值,且植被盖度越大,两者差距越明显。这意味着冲刷流量或者降雨强度越大,泥沙连通性越小,与张光辉^[20]的研究结果有差异。其原因可能是产沙潜力指数是一个相对概念,在其计算过程中,植被斑块的赋值是通过与同冲刷流量下的裸地斑块比较得出的,小流量下的土壤分离和泥沙输移能力有限,难以表现出植被较强的固土阻蚀作用,使得植被斑块和裸地斑块产沙潜力值相近,坡面产沙潜力指数较大;而到了大冲刷流量下,水流对裸地侵蚀力明显增强,植被斑块与裸地斑块的产沙与输沙能力差距拉大,导致坡面产沙潜力指数减小。这也从侧面反映出该指数可突出植被在坡面泥沙连通性变化中的作用。

2.2.2 不同植被位置布局下产沙潜力指数变化特征
产沙潜力指数在不同植被空间配置和冲刷流量下

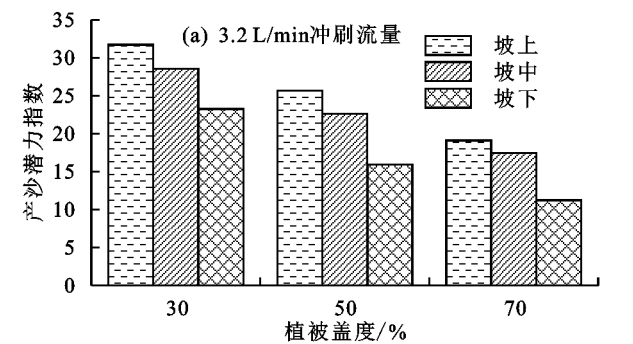


图 5 不同植被空间分布下的产沙潜力指数变化特征

2.3 坡面产沙潜力指数与侵蚀产沙量的关系

从图 6 可以看出,坡面产沙潜力指数与产沙量之间存在显著的相关关系,且坡面产沙量随产沙潜力指数的增加而增大。该指数反映坡面土壤剥蚀和泥沙输移的可能性,产沙潜力越大,泥沙连通性越强,进而产沙量也越大。另外,在相等或相似的产沙潜力指数下,坡面产沙量在不同冲刷流量下并不一致。其原因在于产沙潜力指数是反映坡面泥沙连通性的相对概念,尤其突出植被斑块和裸地斑块的差异,即若植被的减沙效益越大,那么其相应的产沙潜力指数越小。可见,坡面产沙潜力指数可深入反映植被影响下的坡面侵蚀过程变化特征,为揭示植被调控机理和预测坡面侵蚀状况提供全新思路。

3 讨论

近年来,众多学者^[21-23]在植被与坡面侵蚀关系的

表现出明显差异(图 5)。坡上、坡中和坡下分布植被的坡面产沙潜力指数依次递减;3.2 L/min 冲刷流量下,坡下植被分布的平均产沙潜力指数相比坡上和坡中分别下降 60%和 43%,而 5.2 L/min 冲刷流量下分别下降 40%和 26%。这主要是因为坡下植被能更好地保护地表,对坡面侵蚀抑制效果最好,使得该布局下的产沙和输沙能力下降幅度最大,泥沙连通性最弱。此外,冲刷流量影响不同植被空间分布间的产沙潜力值,随冲刷流量增加植被位置对坡面侵蚀的影响程度有所降低,导致各分布下的产沙潜力指数差距有所减小。综上可见,产沙潜力指数可作为反映不同植被空间分布下泥沙连通性变化特征参数之一。

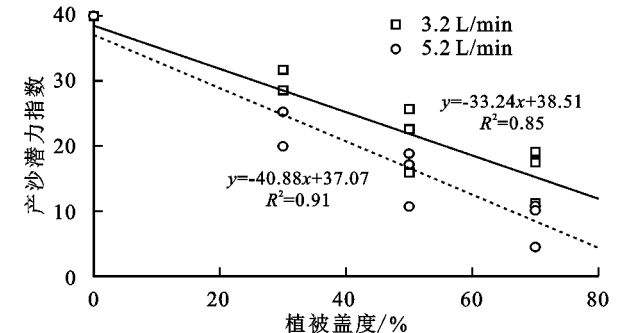


图 4 不同植被盖度下的产沙潜力指数变化特征

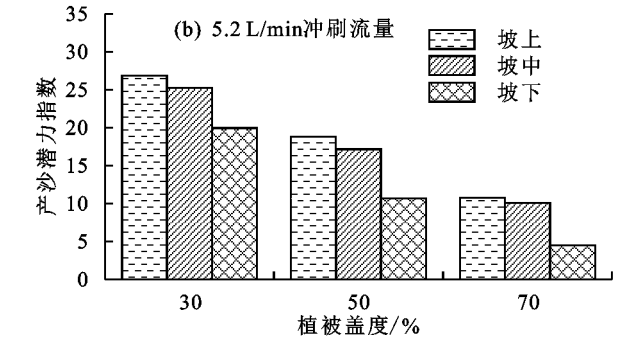


图 6 产沙潜力指数与产沙量的相关关系

相关研究中均得出植被空间布设是坡面侵蚀重要影响因素的结论,但对于植被空间配置影响下的坡面侵蚀机理尚不明确。因此,有必要对不同植被空间分布下的坡面产沙状况及产沙过程进一步探索。

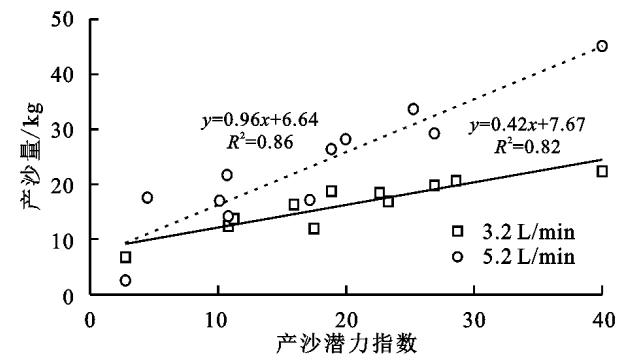


图 6 产沙潜力指数与产沙量的相关关系
本文利用室内人工放水冲刷试验,探究植被空间分布在不同盖度和冲刷流量下的减沙效益变化特征,

表明植被空间分布可显著影响坡面侵蚀状况。整体上,与坡上和坡中分布相比,坡下布设植被的减沙效益最明显,并且在抑制坡面侵蚀方面表现出一定的稳定性,与相关研究^[3,24-25]结果一致。具体地,植被盖度影响植被空间布设与坡面侵蚀产沙的相关关系:在盖度 30%时,坡下植被减沙效益最好;盖度为 50%时,坡中植被减沙量最多;盖度为 70%时,坡上植被保护坡面的效果最明显。此外,随冲刷流量的增加,植被空间配置对坡面侵蚀产沙的影响程度有所减弱。可见,在合理布局植被时需综合考虑当地植被盖度和降水强度,这与余新晓等^[26]研究一致。

为进一步定量表征植被盖度和冲刷流量对坡面侵蚀的影响,借鉴曹梓豪等^[27]计算方法,得到不同植被空间布设下植被盖度和冲刷流量对坡面产沙量的相对贡献指数(表 1),发现随盖度增加,植被对坡面侵蚀产沙量的相对贡献指数基本呈上升趋势,而冲刷流量则相反。当植被盖度为 30%时,冲刷流量对坡面产沙的影响程度略高于植被盖度;从盖度>30%起,植被盖度的作用开始大于冲刷流量。这说明当植被盖度低于 30%时,冲刷流量引起的产沙增加量大于植被的减沙量;而随盖度的增加,植被的存在对冲刷流量引起的产沙量已起到很好的抑制作用,成为影响坡面侵蚀的主要因素。前人^[28]研究表明,50%~60%是天然草地的有效保土盖度,在此范围内植被可有效抑制坡面产沙,这很好地解释了本研究中植被盖度低于 30%时,植被减沙量未能抵消冲刷流量引起的产沙增加量。

表 1 植被盖度和冲刷流量对坡面产沙的相对贡献指数比较

植被分布 位置	植被 盖度/%	相对贡献指数	
		冲刷流量	植被盖度
坡上	30	0.51	0.49
	50	0.42	0.58
	70	0.08	0.92
坡中	30	0.66	0.34
	50	-0.09	1.09
	70	0.21	0.79
坡下	30	0.50	0.50
	50	0.27	0.73
	70	0.17	0.83

泥沙连通性对理解坡面侵蚀过程具有重要作用。本文在前人^[6,11]研究基础上,提出坡面产沙潜力指数,探究不同植被空间配置下的泥沙连通性变化状况,并进一步验证了该指数在坡面侵蚀中的适用性。在植被盖度方面,由于植被盖度增加,坡面直接侵蚀和水沙输移过程受到的阻碍程度增加^[29],因此,产沙

潜力指数呈显著下降趋势,泥沙连通程度减弱,坡面产沙量减少;在植被空间分布方面,坡上、坡中和坡下分布的产沙潜力指数依次递减,反映出植被在坡下布设时泥沙连通程度最弱,抑制坡面侵蚀产沙过程的效果最好。该指数突出了植被在坡面产沙过程中的作用,量化了坡面土壤分离和水沙输移 2 个过程,有利于完善植被调控机理并为退耕还草等生态建设提供新的评价依据。但本研究还存在一些不足,比如忽视了微地形对水沙流动路径的影响、植被类型较单一等。因此,未来需要综合考虑微地形和植被类型的作用,以进一步验证坡面产沙潜力指数的可靠性和完整掌握坡面侵蚀的过程机理。

4 结 论

(1)坡下布设植被的减沙效益最为明显,随冲刷流量增加,不同布局间的植被减沙效益差距缩小。冲刷流量为 3.2 L/min 时,坡下植被的减沙效益相比坡上和坡中最大增加 6%;而冲刷流量提高至 5.2 L/min 时,坡下植被的减沙效益仅增加 2%。

(2)植被空间分布的减沙效益在不同盖度间存在差异:植被盖度为 30%时,坡下分布减沙效益最好;50%植被盖度分布于坡中减沙量最多;盖度提高至 70%时,坡上分布抑制坡面侵蚀的效果最明显。但从不同盖度下的平均减沙效益及其稳定性来看,坡下植被布设最优。

(3)当植被盖度较小(≤30%)时,冲刷流量相比植被对坡面产沙的影响程度较大;随盖度增加,植被的影响贡献程度开始大于冲刷流量,成为影响坡面侵蚀的主要因素。

(4)坡面产沙潜力指数在不同植被盖度和分布位置下表现出明显差异。随盖度增加,产沙潜力指数减小,泥沙连通性减弱;坡下植被空间配置相比坡上和坡中产沙潜力指数最小,泥沙连通性最差。该指数与产沙量之间存在显著的正相关关系,即产沙潜力越大,泥沙连通性越强,产沙量越大。

坡面产沙潜力指数可突出反映植被分布对坡面侵蚀过程的影响,量化植被覆盖下的坡面泥沙连通性变化特征,具有一定的适用性;未来需要进一步考虑微地形与植被类型的作用,以促进坡面侵蚀过程的机理性研究,为黄土高原地区坡面水土保持工作提供重要依据。

参考文献:

[1] 曹文洪,张晓明.新时期黄河流域水土保持与生态保护的战略思考[J].中国水土保持,2020(9):39-42.
[2] Zhang G H, Liu G B, Wang G L. Effects of canopy and

- roots of patchy distributed artemisia capillaris on runoff, sediment, and the spatial variability of soil erosion at the plot scale[J]. Soil Science, 2012, 177(6): 409-415.
- [3] 游珍, 李占斌, 蒋庆丰. 植被在坡面的不同位置对降雨产沙量影响[J]. 水土保持通报, 2006, 26(6): 28-31.
- [4] Ludwig J A, Tongway D J, Maraden S G. Strips, strands on stipples: Modeling the influence of three landscape banding patterns on resource capture and productivity in a semi-arid woodlands, Australia[J]. Catena, 1999, 37(1/2): 257-273.
- [5] Boix-Fayos C, Martinez-Mena M, Arnau-Rosalen E, et al. Measuring soil erosion by field plots: Understanding the sources of variation [J]. Earth-Science Reviews, 2006, 78(3/4): 267-285.
- [6] 闫帅旗, 刘俊娥, 周正朝, 等. 坡面不同植被覆盖格局下的水文连通性变化特征[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 228-234, 242.
- [7] 贾莲莲, 刘雅丽, 朱冰冰, 等. 不同草带空间分布对坡面细沟侵蚀调控机制[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 145-148, 153.
- [8] 于国强, 贾莲莲, 朱冰冰, 等. 不同植被格局对梁峁坡一沟坡的侵蚀动力作用机制[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 10-16.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Mayor A G, Bautista S, Small E E, et al. Measurement of the connectivity of runoff source areas as determined by vegetation pattern and topography: A tool for assessing potential water and soil losses in drylands[J]. Water Resources Research, 2008, 44(10): 298-310.
- [12] 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.
- [13] Bautista S, Mayor A G, Bourakhouadar J, et al. Plant spatial pattern predicts hillslope semiarid runoff and erosion in a Mediterranean landscape[J]. Ecosystems, 2007, 10(6): 987-998.
- [14] Liu Y, Fu B J, Lü Y H, et al. Linking vegetation cover patterns to hydrological responses using two process-based pattern indices at the plot scale[J]. Science China-Earth Sciences, 2013, 56(11): 1888-1898.
- [15] 刘时城. 延河流域不同尺度水文连通性研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [16] 周佩华, 王占礼. 黄土高原土壤侵蚀暴雨的研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(3): 1-5.
- [17] 刘和平, 王秀颖, 刘宝元. 人工模拟降雨下细沟与细沟间流速的沿程分布[J]. 地理研究, 2011, 30(9): 1660-1668.
- [18] 曹梓豪, 赵清贺, 左宪禹, 等. 黄河下游河岸坡面产流产沙特征及其与汇流路径长度关系[J]. 土壤学报, 2018, 55(6): 1389-1400.
- [19] 于现举, 刘晨光, 符素华, 等. 有黏性和无黏性沙坡面流的挟沙力比较[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(6): 9-14.
- [20] 张光辉. 从土壤侵蚀角度诠释泥沙连通性[J]. 水科学进展, 2021, 32(2): 295-308.
- [21] 张冠华, 刘国彬, 易亮. 植被格局对坡面流阻力影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 55-59, 109.
- [22] 鲁克新, 李占斌, 张霞, 等. 室内模拟降雨条件下径流侵蚀产沙试验研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 6-9, 14.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 余新晓, 张学霞, 李建牢, 等. 黄土地区小流域植被覆盖和降水对侵蚀产沙过程的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 1-8.
- [27] 曹梓豪, 赵清贺, 丁圣彦, 等. 坡度和植被盖度对河岸坡面侵蚀产沙特征的影响[J]. 自然资源学报, 2017, 32(11): 1892-1904.
- [28] 魏天兴. 小流域防护林适宜覆盖率与植被盖度的理论分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(2): 170-176.
- [29] 张思毅, 梁志权, 谢真越, 等. 植被调控红壤坡面土壤侵蚀机理[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 1-5, 18.