

坡面不同植被覆盖格局下的水文连通性变化特征

闫帅旗, 刘俊娥, 周正朝, 边焯, 朱冰冰

(陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119)

摘要: 为深入探索不同植被盖度及其格局在不同冲刷流量下的坡面侵蚀过程机理, 利用野外人工冲刷试验, 以自然恢复草本植被小盖度格局、坡上相对聚集格局、坡中相对聚集格局、坡下相对聚集格局和较大盖度格局为研究对象, 通过引入水流路径长度和水流阻抗指数, 分析了不同植被盖度及格局对坡面侵蚀和水文连通性的影响作用。结果表明: (1) 植被盖度及格局可影响坡面的侵蚀状况。坡面植被盖度为 13.5% 的产流产沙量分别是盖度为 34.0% 坡面对应值的 2.36, 3.02 倍; 同时与坡上和坡中相对聚集格局相比, 坡下相对聚集格局的坡面产流产沙量最多, 其中产流量分别增加 16.42% 和 8.00%, 产沙量分别增加 26.53% 和 23.56%。但随着冲刷流量的增加, 不同植被盖度和覆盖位置下的坡面产流产沙量差距减小。(2) 植被盖度与水流路径长度和水流阻抗指数间均存在显著的线性关系。同时水流路径长度在不同覆盖格局下存在差异, 其中坡上相对聚集格局的水流路径长度分别比坡中和坡下相对聚集格局减少 10.89% 和 18.33%。而水流阻抗指数在不同覆盖格局下表示意义不明确, 但可灵活反映不同试验条件下的水文连通性变化。(3) 坡面产流产沙量随水流路径长度和水流阻抗指数增加呈显著的指数变化趋势。水流路径长度和水流阻抗指数均可作为反映坡面侵蚀过程及其机理的参数之一。该研究成果对于深入理解坡面侵蚀过程机理及定量评价水文连通性与植被和坡面侵蚀的作用关系具有参考价值, 从而为坡面侵蚀预测模型完善和地区生态环境建设提供评价依据。

关键词: 坡面; 植被格局; 侵蚀; 水文连通性

中图分类号: TV121⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0228-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.06.031

Variation Characteristics of Hydrological Connectivity Under Different Slope Cover Patterns

YAN Shuaiqi, LIU Jun'e, ZHOU Zhengchao, BIAN He, ZHU Bingbing

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

Abstract: Vegetation cover and its pattern generally determine the mechanisms in the runoff and sediment reduction under different flow rates. In this paper, the responses of sediment yield to the interaction effects of vegetation cover age and slope positions were revealed through field experiments, including the lowest coverage pattern, relatively concentrated distribution on the upper of the slope, relatively concentrated distribution on the middle of the slope, relatively concentrated distribution on the lower of the slope, and the highest coverage pattern. Then the relation between hydrodynamic connectivity of slope and soil erosion were analyzed by three kinds of hydrological connectivity indexes (FL , FL_r , FL_s). The results showed that: (1) Vegetation cover and its pattern are important factors affecting slope soil erosion process. The sediment yield of the slope with vegetation coverage of 13.5% was about 2.36 and 3.02 times of the slope with coverage of 34.0%, respectively. At the same time, compared with relatively concentrated distribution on the upper and middle of the slope, relatively concentrated distribution on the lower of the slope was mostly in the slope. The regulation functions on runoff and sediment with the grass strip relatively concentrated distribution on the lower part of the slope were generally worse. Among them, the runoff amount increased by 16.42% and 8.00%, respectively, and the sediment yield increased by 26.53% and 23.56%, respectively. However, with

收稿日期: 2021-06-17

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); 国家自然科学基金项目“黄土高原水蚀风蚀交错区细沟水流分离—输沙过程模拟”(42077058)

第一作者: 闫帅旗(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 2576711345@qq.com

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

the increase of the flow rates, the gap between the yields of runoff and sediment in different vegetation coverage was reduced. (2) FL , FL_r and FL_s , the important indexes of hydrological connectivity, exhibited linear correlation relationship to vegetation coverage. Meanwhile at the condition of three kinds of grass strip positions, the difference of FL was obvious. Under the experimental conditions, compared with the relatively concentrated distribution on the middle and lower of the slope above, the FL on the relatively concentrated distribution on the upper slope were decreased by 10.89% and 18.33%, respectively. By the research, there was no significant covariability has been found between the FL_r and FL_s with vegetation patterns. But it could flexibly reflect the changes in hydrological connectivity under different test conditions. (3) There were significant correlations between the hydrological parameters and slope soil erosion. And the increase of FL_r and FL_s and the decrease of FL could cause an exponentially reduction in the amount of runoff yield and sediment production. Thus, FL , FL_r , and FL_s can be used to indicate the hydrodynamic parameters of slope surface water flow and sediment yield in the change. The results have reference value for deep understanding of slope erosion process and quantitative evaluation of hydrological connectivity and vegetation and slope erosion, providing evaluation of random erosion prediction model and regional ecological environment construction.

Keywords: slope; vegetation cover patterns; erosion; hydrological connectivity

黄河流域构成了我国重要的生态屏障。长期以来,我国在黄土高原实行的植被恢复工程使区域生态环境明显转好^[1-3]。但受制于水资源的有限性,该地区植被无法达到完全覆盖,若盲目提高植被盖度,会引发一系列生态环境和社会发展问题^[4-6]。因此,需要综合考虑植被分布格局对水沙输移的影响,为黄土高原地区更高质量的生态建设提供参考^[7]。植被分布格局主要包括植被的排列方式、覆盖位置等形式。在坡面尺度上,Zhang 等^[8]和杨琰青等^[9]探索发现,植被排列方式与坡面流水动力特性具有一定关系;Puigdefábrega^[10]和 Bartley 等^[11]研究表明,植被斑块分布的均匀度是影响坡面侵蚀的重要因子,且坡面下部为裸地或少量植被时,其产沙量可相差 60 倍;另有众多学者^[12-15]在不同试验条件和覆盖位置下研究了植被格局对坡面侵蚀的影响,证明了植被位于坡面下部时水土保持效益最高。但由于坡面侵蚀的复杂性,目前对植被格局与水土流失关系的研究主要是对植被分布方式和位置下的定性描述,缺乏合适的定量表征参数,使得相关研究停留在不同植被格局下坡面侵蚀变化的简单描述,且表征坡面植被分布特征如斑块密度、斑块聚集度等的传统景观指数无法深入揭示植被在径流泥沙输移路径中的作用机理^[16-17]。因此,寻找一个合适的参数对于理解坡面侵蚀过程机理及完善坡面侵蚀预报模型具有很强的必要性。

近年来,水文连通性作为理解坡面侵蚀过程机理的重要工具得到重视^[18-21]。Mayor 等^[22]基于“源”“汇”理论,提出水流路径长度(FL)概念,用于量化源汇间的水文连通性,并发现该指数与产流产沙量之间具有显著的相关关系。之后,国内学者^[23-24]将水流路径长度(FL)用于研究不同尺度的水文连通性变化及

其与土壤侵蚀之间的关系,并认为其可以作为定量表征植被与坡面侵蚀关系的参数。但 FL 指数将植被作为完全的“汇”,未考虑现实情况下径流、泥沙会以一定的比例通过植被斑块^[25]。Liu 等^[23]引入了权重系数,建立了改进的 FL 指数,更真实地反映不同植被类型对径流泥沙的阻滞作用;刘时城^[26]根据植被在产流产沙中的角色,进一步将水文连通性指数分为基于源汇的指数和基于阻抗的指数。本文在以上研究的基础上,通过野外人工冲刷试验,分别计算了基于源汇的水流路径长度指数(FL)和基于阻抗的水文连通性指数(FL_r 和 FL_s),分析了 2 种指数与坡面产流产沙量的关系,探索上述指数在反映坡面侵蚀过程机理和预测坡面土壤侵蚀研究中的合理性,为建立合适的植被格局表征和评价提供依据,从而提高本地区的草地建设质量,最大化发挥出植被的生态功能,以期为生态与社会经济的可持续发展做出贡献。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原地区的坊塌流域(36°47'19"—36°49'35"N,109°14'40"—109°17'09"E),流域面积为 8.66 km²。该地属于黄土丘陵沟壑区,流域沟壑密度 3.8 km/km²,海拔高度为 997~1 731 m,坡度以 8°~25°为主^[27]。气候属于温带季风向温带大陆性过渡类型,多年年均降水量为 542.5 mm,降水季节分布不均,夏季多暴雨;土壤类型以黄绵土为主,水土流失严重。植被类型以白羊草、铁杆蒿、狼牙刺等草灌混合带为主^[28]。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 本研究于 2017 年 7 月采用人工径流小区放水冲刷的方式进行。人工径流小区修建在 1 个撂荒 30 余年的坡面中部,土壤性质见表 1。植被

类型以铁杆蒿为主,同时还存在少量的达胡、猪毛蒿、黑麦草等;坡向为半阴半阳坡,坡度在 $15^{\circ}\sim 18^{\circ}$ 。试验时,用 PVC 板围成水平投影长宽为 $2\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 的径流小区,其中 PVC 板嵌入地下 0.2 m ,露出地表 0.1 m 。坡顶放置稳流槽,坡底安装三角堰。利用照相法(尼康 COOLPIX6400)确定植被状况,采集时相机离地面 1 m 垂直拍照,投影面积为 $0.5\times 0.5\text{ m}^2$,并在 4 角设置标点,每个小区拍摄 4 次,将 4 张照片从上到下进行拼接,并用 ARCGIS 10.3 进行目视解译^[29],确定出植被盖度以及覆盖格局。各径流小区概况见表 2,包括 3 种植被覆盖梯度和 5 种植被覆盖格局。格局 A 和格局 E 的植被为全小区均匀覆盖,覆盖度分别为 13% 和 34%,格局 B、C、D 的覆盖度接近,为 21% 左右,但植被聚集区域不一致。

表 1 土壤理化性质

类别	容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	有机质/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	水稳性 团聚体/%
植被覆盖	1.283	26.456	42.240
裸地	1.422	20.006	32.690
平均	1.353	23.221	37.465

表 2 径流小区基本情况

小区编号	植被盖度	覆盖格局	坡度/($^{\circ}$)
P1	0.135	极小盖度格局(格局 A)	15.37
P2	0.235	坡上相对聚集格局(格局 B)	16.93
P3	0.210	坡中相对聚集格局(格局 C)	17.13
P4	0.225	坡下相对聚集格局(格局 D)	17.73
P5	0.340	较大盖度格局(格局 E)	15.27

根据黄土高原暴雨发生频率及参考其他研究者的人工冲刷试验,将冲刷流量设定为 5, 10 L/min。每次试验前,率定好冲刷流量,且在坡面均匀洒水 10 L 左右,并用便携式土壤水分测量仪(TRIME-Pico 64/32 TDR, IMKO, 德国)测定土壤含水量,保证前期土壤含水量基本一致。在做好试验前的准备工作后,打开供水阀门,坡顶稳流槽开始溢流后,即可开始计时,同时使用水桶收集水沙样品,在冲刷 15 min 后停止试验。试验结束后,采用置换法计算每场冲刷试验的水沙总量^[30]。此外,为增强试验数据的可靠性,每场试验重复 2 次,结果取平均值,且 2 次试验结果较稳定,故无需再进行重复试验。

1.2.2 水文连通性指数计算 FL 为基于源汇的指数,表示“栅格地图中的各个像元达到汇区的水流路径长度的平均值”; FL_r 和 FL_s 属于基于阻抗的水文连通性指数, FL_r 用于模拟径流在小区中的路径长度(cm); FL_s 用于模拟泥沙在小区中的路径长度(cm)。根据 Mayor 等^[22] 和刘时城^[26] 提出的计算原理,并结合本试验的具体情况,将 $2\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 的径流小区划分为 400 个 $0.05\text{ m}\times 0.05\text{ m}$ 的单元格,利用 ARC-

GIS 10.3 的目视解译区分出裸地斑块和植被斑块。具体计算为:

(1)在 FL 的计算过程中,将裸地斑块视为水沙的源区,而植被斑块作为水沙的汇区,即裸地斑块产生的水沙可被植被斑块完全拦截。因此计算时,植被斑块的水沙流动默认为 0,而从每个裸地斑块出发的水沙,依据单一流向算法^[31],按照由高到低的梯度方向,从一个单元格到另一个单元格向坡下流动,在遇到植被斑块或流出径流小区时,即可停止。

(2) FL_r 根据草地的减流效益对裸地和植被设置相应的权重;而 FL_s 根据草地的减沙效益对裸地和植被匹配相应的权重。在 FL_r 和 FL_s 的计算过程中,由于植被具有明显的减水减沙效益,因此将裸地斑块的权重值设为 1,而植被斑块的权重值肯定大于 1。这样的赋值意在假设水沙通过植被斑块会遇到更大的阻抗。因此,水流经过植被栅格会产生比经过裸地更长的水流路径^[26]。同一冲刷流量下,以小盖度格局为基准,分别与其他 4 种格局比较,计算出各格局相对应的减水减沙效益,取其平均值,作为该冲刷流量下植被的减水减沙效益,并求出裸地和植被的产水产沙能力的比值,对植被单元格进行赋值。且每个单元格的水沙,依据单一流向算法^[30],按照由高到低的梯度方向,从一个单元格到另一个单元格向坡下流动,在流出径流小区时,才可停止。

按照上述规则,计算每个单元格的水流路径长度和水流阻抗指数,对所有单元格计算值取平均,即为坡面的水流路径长度和水流阻抗指数。

2 结果与分析

2.2 坡面植被格局对侵蚀产沙的影响

2.2.1 坡面侵蚀与植被覆盖度的关系 坡面产流产沙量均与植被盖度间存在显著的指数递减关系(图 1)。植被盖度为 13.5% 的坡面的产流产沙量分别是盖度为 34% 坡面的 2.36, 3.02 倍,这主要是因为植被可增加地表粗糙度,削弱坡面流流速和水流动能,进而降低水流侵蚀搬运能力。但在不同覆盖位置条件下(格局 B、C 和 D),坡面产流产沙量与植被盖度的变化关系不明显,可见植被覆盖位置可显著影响坡面的侵蚀状况。证明在黄土高原地区退耕还草生态建设中考虑植被布局是有必要的。同时,各冲刷流量下的坡面产流产沙量随植被盖度增加变化幅度减小,说明植被与坡面侵蚀之间的作用关系存在一定的阈值,当植被盖度小于阈值时,植被盖度对坡面产流产沙量影响强烈;大于阈值时,植被盖度对坡面侵蚀影响将趋于稳定,与 Meng 等^[31] 研究结果一致。

此外,通过不同冲刷流量产流产沙量比较发现,各格局在冲刷流量 10 L/min 的平均产流产沙量分

别是 5 L/min 的 2.9,3.4 倍,可见在其他试验条件基本一致情况下,冲刷流量越大,坡面侵蚀就越严重。这主要与水流流量增大,动能增强有关。但随着植被盖度增加,不同冲刷流量下坡面产流产沙量之间的差

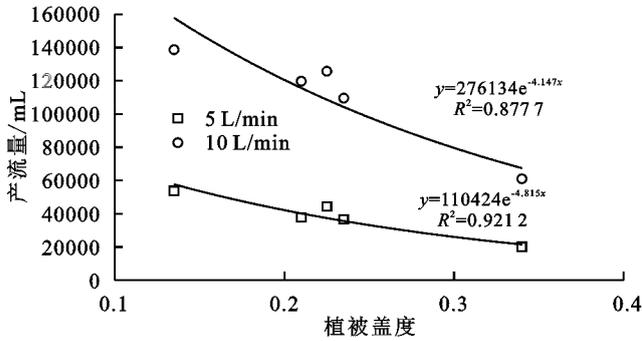


图 1 不同冲刷流量下植被盖度与坡面产流产沙量关系

2.2.2 坡面侵蚀与植被格局的关系 由图 2 可知,不同植被格局的坡面产流产沙量存在差异,且格局 B、C 和 D 的坡面产流产沙量依次递增,表明与坡中和坡下相对聚集格局相比,坡上相对聚集格局水土保持效益最好。这与张霞等^[33]的研究结果不同,可能是因为格局 D 的坡面中上部以裸地为主,水流可获得充分加速,植被对已经形成汇聚的径流减速作用有限,径流侵蚀力较强,再加上该植被格局下的植被在坡面下部并没有达到完全覆盖,使得水流对靠近出口的裸地产生强烈侵蚀,导致格局 D 的产沙量较高。

此外,冲刷流量可影响不同植被格局下产流产沙量的对比关系。其中冲刷流量为 5 L/min 时,与格局 B 相比,格局 C 和 D 的坡面产流量分别增加 3.31% 和 21.39%,产沙量分别增加 3.86% 和 28.05%;而冲刷流量提高至 10 L/min 时,与格局 B 相比,格局 C 和 D 的坡面产流量分别增加 9.3% 和 14.77%,产沙量分别增加 3.31% 和 21.39%。可见,除格局 C 的产流量外,各覆盖格局下坡面产流产沙量的差距减小,即植被格局在大冲刷流量下对坡面产流产沙量的影响程度有所减弱,与 Keesstra 等^[34]得出的结论一致。

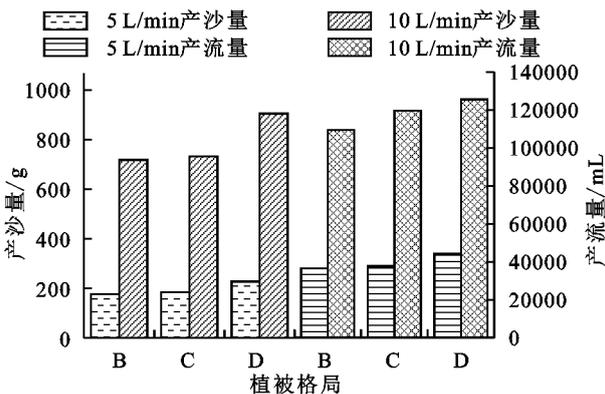
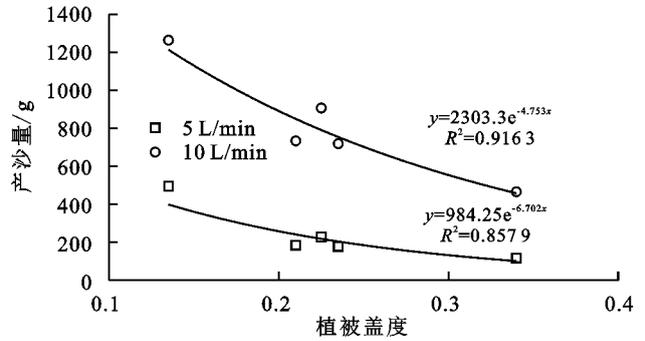


图 2 不同植被格局坡面产流产沙量变化

2.3 坡面水文连通性特征变化

2.3.1 水流路径长度变化特征 从表 3 可以看出,

距缩小,说明冲刷流量在大盖度植被下对坡面侵蚀的影响程度有所减弱,即植被的减水减沙效益在较大盖度和大冲刷流量下会表现的更加突出,与王玲玲等^[32]研究结果相似。



植被覆盖可显著影响 FL, 并且 FL 与植被盖度之间存在显著的负线性关系 ($P < 0.01$)。其主要原因在于植被作为坡面侵蚀的“汇”,会切断水沙的流动路径;同时植被覆盖度越高,裸地斑块受阻可能性越大,导致坡面水沙流动长度缩短和水文连通性变差。

从不同覆盖位置上看,坡面 FL 在格局 B、C、D 上依次递增。与格局 B 相比,格局 C 和 D 的 FL 值分别增加 12.22% 和 22.44%。可见植被主要聚集在坡面上部时,水文连通性最差。这主要与植被分布状况有关,B 格局下的植被分布比格局 C 和格局 D 更加分散,即植被把裸地斑块切割的更加破碎,水沙流动更易被植被斑块所拦截,使得坡面水流路径长度减小。说明调整植被覆盖位置及分布均匀程度可改变坡面的水文连通性状况。

表 3 不同植被覆盖格局下 FL 变化情况

覆盖格局	植被盖度	水流路径长度/cm
格局 A	0.135	0.297
格局 B	0.235	0.201
格局 C	0.210	0.225
格局 D	0.225	0.246
格局 E	0.340	0.101

2.3.2 水流阻抗指数变化 FL_r 和 FL_s 随植被盖度增加呈极显著的线性递增趋势(图 3, $P < 0.001$)。这主要是因为植被覆盖度越高,植被斑块越密集,水沙流动遇到的障碍物越多,水沙通过坡面所遇到的阻抗力就越大。同时由于 FL_r 和 FL_s 根据植被的减水减沙率对植被斑块进行赋值,导致一方面水流阻抗指数在坡面产流产沙中存在不同;另一方面冲刷流量可影响植被盖度与 FL_r 和 FL_s 的相关关系。总体上看,冲刷流量 5 L/min 的 FL_r 和 FL_s 要大于冲刷流量 10 L/min 的对应值。这是因为随着冲刷流量增大,水流动能增强,植被对水沙的阻抗作用减弱,导致 FL_r 和 FL_s 下降。具体来看,由于较大冲刷流量会导致植

被的减水减沙效益下降,且植被盖度越低,下降趋势越明显,从而影响植被斑块的赋值及 FL_r 和 FL_s 的变化,导致不同冲刷流量间的 FL_r 和 FL_s 的数值差距随着植被盖度的增加有所增大。可见,水流阻抗指数对不同冲刷流量和植被盖度的响应程度不同。

同时植被覆盖位置也会影响坡面 FL_r 和 FL_s 变化情况,相近盖度下, FL_r 和 FL_s 表现为格局 D > 格局 C > 格局 B。其原因可能是基于 FL_r 和 FL_s 的计算原理,格局 B 的植被使得水沙在坡面上部流动时遇到的障碍增加,其在坡面上部的植被范围内随着水流方向数值下降较快;而格局 D 的坡面中上部以裸地为主,使得在该范围内的单元格沿着坡下方向数值下降较慢,导致 FL_r 和 FL_s 在格局 D 时最大,在格局 B 下最小。

2.4 坡面产流产沙量与水流路径长度和水流阻抗指数关系

2.4.1 坡面产流产沙量与 FL 关系

从图 4 可以看出,坡面产流产沙量均随 FL 增加而呈显著的指数递增趋势。其原因在于 FL 越大,水流在坡面上获得的加速度越大,水流动能和侵蚀力越强,使得坡面受到的侵蚀可能性就越大。同时随着 FL 的增加,坡面产流产沙量增长的趋势加快,并且冲刷流量越大,其表现特征越明显。这主要是因为 FL 较大时,植被盖度较低,植被斑块较少,对水流的水动力性质影响程度较低,拦截水沙的效果较差;并且随着冲刷流量增加,植被蓄水减沙的能力下降。

此外,冲刷流量会显著影响 FL 与坡面产流产沙量的相关关系。同 FL 下,冲刷流量 10 L/min 的产流产沙量远大于 5 L/min 的对应值,这主要与冲刷流

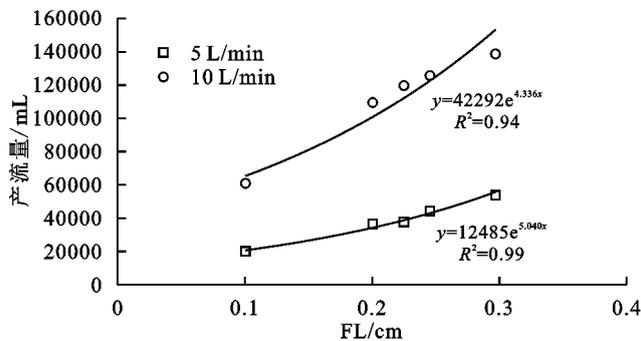


图 4 不同冲刷流量 FL 与产流产沙量关系

2.4.2 坡面产流产沙量与 FL_r 和 FL_s 关系

FL_r 和 FL_s 可影响坡面的产流产沙量,且两者之间存在极显著的指数关系 ($P < 0.01$, 图 5)。其原因在于随着 FL_r 和 FL_s 的增加,水沙在坡面流动时受到的阻碍增加,水沙通过坡面的潜力和可能性降低,进而导致坡面产流产沙量减少。同时与 FL_r 和坡面产流量相比, FL_s 与产沙量的相关关系更为显著。这可能是因为植被覆盖格局对水和沙流动的阻碍度不同,即植被

量变大,水流动能和坡面侵蚀增强有关。综上可见, FL 可作为预测坡面侵蚀的参数之一。

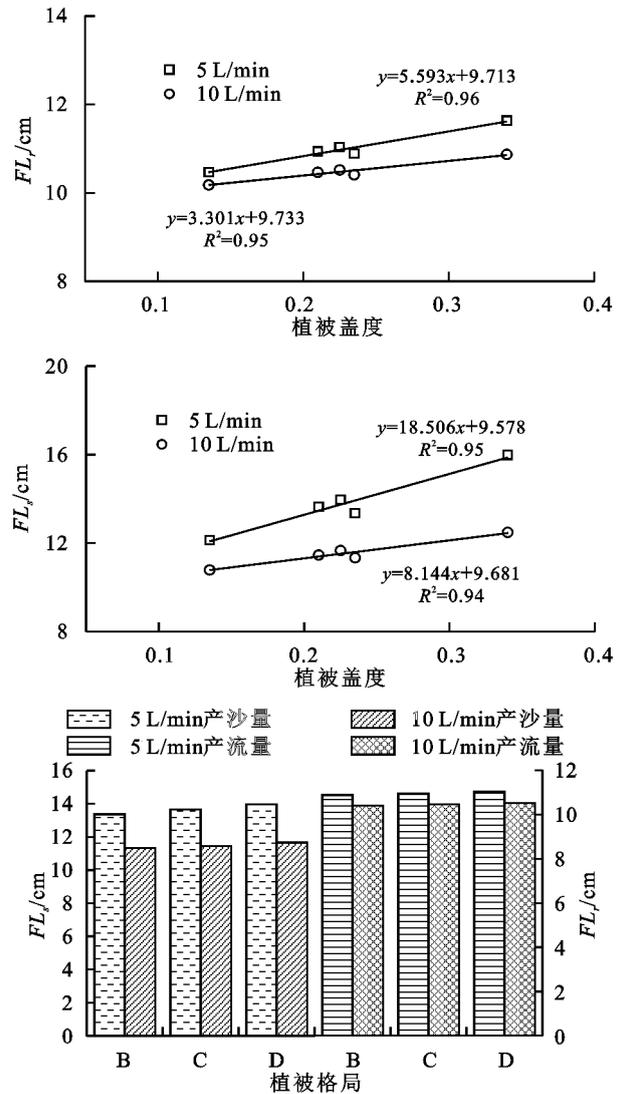
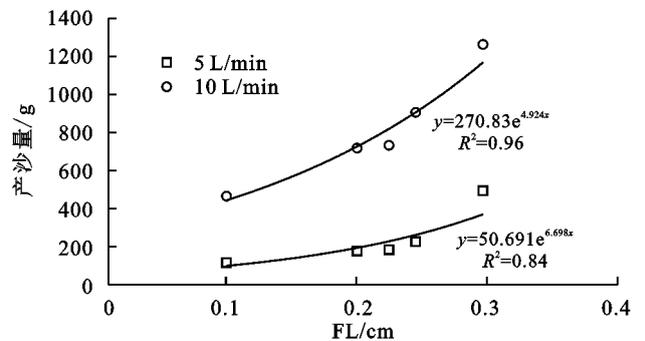
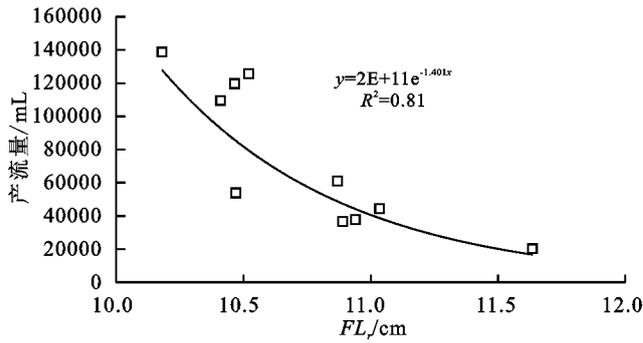
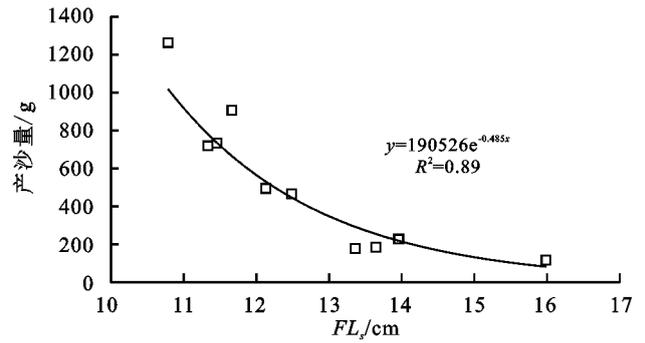


图 3 不同覆盖格局下 FL_r 和 FL_s 变化特征



覆盖格局对泥沙的拦截效果更明显,导致 FL_s 与产沙量的相关性更高。综上,可知水流阻抗指数可作为预测不同植被盖度和冲刷流量下坡面水文连通性和产流产沙状况的参数之一。

另外,虽然水流阻抗指数和坡面产流产沙关系的相关程度 R^2 值低于水流路径长度,但可根据不同冲刷流量下的植被减水减沙效益对植被斑块权重进行赋值,以更准确和更灵活地反映出坡面水文连通性变化。

图 5 不同冲刷流量 FL_r 与 FL 和产流产沙量关系

3 讨论

植被盖度及其格局是影响坡面侵蚀的主要因素之一^[35]。其一方面通过覆盖地表削弱雨滴对土壤的溅蚀,另一方面通过改变土壤性状,提高土壤抗蚀性和水分入渗效率,同时增加地表粗糙度,降低水流动能和减弱地表径流对坡面的侵蚀。但迄今为止对于不同外界条件下植被引起的坡面水文连通性变化及侵蚀机理尚不明确。

对于植被在不同盖度和坡面位置下引起的水土流失变化,多数学者^[36-37]得出植被盖度与坡面产流产沙量具有指数或线性关系的结论,且盖度相近时植被位于坡面中下部时减水减沙效益最好^[12-15]。但上述研究多集中在较大盖度范围内的坡面侵蚀变化探究,对小盖度范围内的坡面产流产沙量变化特征探索较为匮乏;同时将植被严格按照坡面位置进行布局,过于理想化,与实际不符。另外,在自然状态下,植被往往呈簇状分布。且由于半干旱区受自然条件和人类活动的影响,局部坡面植被覆盖率较低,成为水土流失的重灾区,可见对小盖度植被进行探究具有一定的现实依据与必要性。因此,本文选取植被盖度较低且符合实际分布的坡上、坡中和坡下相对聚集格局的坡面进行试验分析,发现坡面产流产沙量随植被盖度增加呈显著的指数减小趋势,以及与坡中和坡下相对聚集格局相比,坡上相对聚集格局产流产沙量最小。本试验有助于进一步开拓植被覆盖位置与坡面侵蚀的关系探究,以加深植被格局对坡面侵蚀影响的理解。

此外,多数研究^[16,38]尚未将不同覆盖位置下坡面产流产沙量的差异进行量化,导致植被覆盖位置对坡面侵蚀的影响差异及其作用机制尚不明确。为此,本研究运用水流路径长度和坡面阻抗指数,研究了 2 种指数与植被盖度和坡面产流产沙量的相关关系,证实了不同试验条件下“源”“汇”间的水文连通性在干旱半干旱区土壤侵蚀中存在影响。与水流路径长度相比,水流阻抗指数在不同植被覆盖格局中的应用不显著,但可根据不同冲刷流量下的植被减水减沙效益

进行变化调整,表现出较强的灵活性和适应性,以更直观地反映出坡面水文连通性的变化。与其他研究不同,本文着重研究植被影响下的坡面侵蚀状况和水文连通性的变化以及两者的相关关系。因此,在未来研究中,需要考虑地形在坡面水文连通性中的影响,以更完善地反映出水流路径长度和水流阻抗指数与坡面产流产沙量的相关关系,最终深化 2 个指数在坡面侵蚀预测和机理探究中的应用。

4 结论

(1) 植被盖度和格局可显著影响坡面的侵蚀状况,且与坡上和坡中相对聚集格局相比,坡下相对聚集格局的坡面产流产沙量最大,其中产流量分别增加 16.42% 和 8.00%,产沙量分别增加 26.53% 和 23.56%。但随着冲刷流量的增加,不同植被盖度和覆盖格局下的坡面产流产沙量差距减小。

(2) 植被盖度及格局可影响水流路径长度和水流阻抗指数。植被盖度与水流路径长度和水流阻抗指数间均存在显著的线性关系。坡上相对聚集格局的水流路径长度分别比坡中和坡上相对聚集格局减少 10.89% 和 18.33%,水文连通性最差。而水流阻抗指数在覆盖格局上表示不明确。

(3) 水流路径长度与水流阻抗指数和坡面产流产沙量均存在极显著的相关关系。与水流路径长度指数相比,水流阻抗指数可反映不同试验条件下的水文连通性变化,具有一定的灵活性和适应性。

未来需要考虑地形对水文连通性及坡面侵蚀的影响,以进一步掌握水文连通性与坡面侵蚀及其过程机理的关系和完善土壤侵蚀预报模型,从而为黄土高原退耕还林还草等生态建设提供技术支持。

参考文献:

- [1] Zhao A Z, Zhang A B, Liu J H, et al. Assessing the effects of drought and “Grain for Green” Program on vegetation dynamics in China’s Loess Plateau from 2000 to 2014[J]. *Catena*, 2019, 175: 446-455.
- [2] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, et al. Balancing green and

- grain trade[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 10(8): 739-741.
- [3] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38-41.
- [4] Shanguan Z P. Soil desiccation occurrence and its impact on forest vegetation in the Loess Plateau of China [J]. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 2007, 14(3): 299-306.
- [5] Jiang W Y, Yang S L, Yang X X, et al. Negative impacts of afforestation and economic forestry on the Chinese Loess Plateau and proposed solutions[J]. *Quaternary International*, 2016, 399(5): 165-173.
- [6] Shen M S, Zhang J J, Zhang S H, et al. Seasonal variations in the influence of vegetation cover on soil water on the loess hillslope [J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(9): 2148-2160.
- [7] Han Y N, Niu J Z, Xin Z B, et al. Optimization of land use pattern reduces surface runoff and sediment loss in a hilly-gully watershed at the Loess Plateau, China [J]. *Forest Systems*, 2016, 25(1): e054.
- [8] Zhang S T, Zhang J Z, Liu Y C, et al. The effects of vegetation distribution pattern on overland flow [J]. *Water and Environment Journal*, 2018, 32(3): 392-403.
- [9] 杨琰青, 王雯, 顾中明, 等. 不同布置形态下刚性淹没植被对水流特性的影响 [J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(5): 167-171.
- [10] Puigdefábrega J. The role of vegetation patterns in structuring runoff and sediment fluxes in dryland [J]. *Earth Surface Process Landforms*, 2005, 30(2): 133-147.
- [11] Bartley R, Corfield J P, Abbott B N, et al. Impacts of improved grazing land management on sediment yields, Part 1: Hillslope processes [J]. *Journal of Hydrology processes*, 2010, 389(3): 237-248.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [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] 赵炯昌, 潘岱立, 卫伟, 等. 植被格局对土壤入渗和水沙过程影响的模拟试验研究 [J]. *生态学报*, 2021, 41(4): 1373-1380.
- [16] 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.
- [17] Cristina F, José M F A, José A V. Exploring the effect of hydrological connectivity and soil burn severity on sediment yield after wildfire and mulching [J]. *Land Degradation and Development*, 2020, 31(13): 1611-1621.
- [18] 孙然好, 孙龙, 苏旭坤, 等. 景观格局与生态过程的耦合研究: 传承与创新 [J]. *生态学报*, 2021, 41(1): 415-421.
- [19] 穆兴民, 李朋飞, 高鹏, 等. 土壤侵蚀模型在黄土高原的应用述评 [J]. *人民黄河*, 2016, 38(10): 100-110, 114.
- [20] 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.
- [21] Puttock A, Macleod C, Bol R, et al. Changes in ecosystem structure, function and hydrological connectivity control water, soil and carbon losses in semi-arid grass to woody vegetation transitions [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38(13): 1602-1611.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 曹梓豪, 赵清贺, 左宪禹, 等. 基于坡面水文连通性的黄河下游河岸缓冲带植被格局优化 [J]. *应用生态学报*, 2018, 29(3): 739-747.
- [25] 高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 等. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展 [J]. *生态学报*, 2013, 33(1): 12-22.
- [26] 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.
- [27] 张意奉, 焦菊英, 陈一先, 等. 陕北安塞坊塌小流域的沟道形态及其泥沙连通性 [J]. *水土保持研究*, 2019, 26(3): 11-15.
- [28] 曹剑侠, 温仲明, 李锐. 延河流域典型物种分布预测模型比较研究 [J]. *水土保持通报*, 2010, 30(3): 134-139.
- [29] 章文波, 刘宝元, 吴敬东. 小区植被覆盖度动态快速测量方法研究 [J]. *水土保持通报*, 2001, 21(6): 60-63.
- [30] 沈中原. 坡面植被格局对水土流失影响的实验研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [31] Meng Z J, Dang X H, Gao Y, et al. Interactive effects of wind speed, vegetation coverage and soil moisture in controlling wind erosion in a temperate desert steppe, Inner Mongolia of China [J]. *Journal of Arid Land*, 2018, 10(4): 534-547.
- [32] 王玲玲, 姚文艺, 申震洲, 等. 草被覆盖度对坡面流体力学参数的影响及其减沙效应 [J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(1): 80-83, 91.

- [15] 杨小振,张显,马建祥,等.滴灌施肥对大棚西瓜生长、产量及品质的影响[J].农业工程学报,2014,30(7):109-118.
- [16] 王连君,王程翰,乔建磊,等.膜下滴灌水肥耦合对葡萄生长发育、产量和品质的影响[J].农业机械学报,2016,47(6):113-119.
- [17] 吴立峰,张富仓,范军亮,等.水肥耦合对棉花产量、收益及水分利用效率的效应[J].农业机械学报,2015,46(12):164-172.
- [18] 李银坤,郭文忠,薛绪掌,等.不同灌溉施肥模式对温室番茄产量、品质及水肥利用的影响[J].中国农业科学,2017,50(19):3757-3765.
- [19] 刘小刚,孙光照,彭有亮,等.水肥耦合对芒果光合特性和产量及水肥利用的影响[J].农业工程学报,2019,35(16):125-133.
- [20] 胡晓辉,高子星,马永博,等.基于产量品质及水肥利用率的袋培辣椒水肥耦合方案[J].农业工程学报,2020,36(17):81-89.
- [21] Yildirim E, Guvenc I, Turan M, et al. Effect of foliar urea application on quality, growth, mineral uptake and yield of broccoli (*Brassica oleracea* L., var. *italica*) [J]. Plant, Soil and Environment, 2007, 53(3):120-128.
- [22] Yoldas F, Ceylan S, Yagmur B, et al. Effects of nitrogen fertilizer on yield quality and nutrient content in broccoli [J]. Journal of Plant Nutrition, 2008, 31(7):1333-1343.
- [23] 赵鹏志.水肥耦合对贺兰县供港蔬菜光合、品质及产量的影响[D].银川:宁夏大学,2020.
- [24] 田德龙,侯晨丽,马鑫,等.膜下滴灌小麦—西兰花复种水肥利用效率[J].干旱地区农业研究,2020,38(4):121-127.
- [25] 李建明,潘铜华,王玲慧,等.水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2014,30(10):82-90.
- [26] 李录山,张国斌,胡云飞,等.水肥耦合对西兰花光合及叶绿素荧光参数的影响[J].安徽农业科学,2015,43(10):9-12.
- [27] 蒋静静,屈锋,苏春杰,等.不同肥水耦合对黄瓜产量品质及肥料偏生产力的影响[J].中国农业科学,2019,52(1):86-97.
- [28] 戴嘉璐,李瑞平,李聪聪,等.河套灌区节水减肥对玉米不同生育期水分和养分的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):271-277.
- [29] 毕舒贻,曹婧,李跃,等.不同水肥组合对苜蓿品质的影响[J].草地学报,2018,26(1):105-113.
- [30] 蒋严波,凌忠,韦献东,等.基于主成分分析法的枫香耐铅性及土壤修复潜力研究[J].水土保持学报,2021,35(2):369-376.
- [31] 侯裕生,王振华,李文昊,等.极端干旱区滴灌葡萄水肥适宜用量主成分分析法[J].排灌机械工程学报,2021,39(1):89-95.
- [32] 王振华,陈潇洁,吕德生,等.水肥耦合对加气滴灌加工番茄产量及品质的影响[J].农业工程学报,2020,36(19):66-75.
- [33] 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.
- [34] Keesstra S, Pereira P, Novara A, et al. Effects of soil management techniques on soil water erosion in apricot orchards [J]. Science of the Total Environment, 2016, 551/552:357-366.
- [35] He Q, Dai X A, Chen S Q. Assessing the effects of vegetation and precipitation on soil erosion in the Three-River Headwaters Region of the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Journal of Arid Land, 2020, 12(5):865-886.
- [36] Chen H, Zhang X P, Abla M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2018, 170:141-149.
- [37] 吴蕾.黄土高原植被水土保持作用的研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [38] 高常军,高晓翠,贾朋.水文连通性研究进展[J].应用与环境生物学报,2017,23(3):586-594.

(上接第 234 页)