

不同草带覆盖位置条件下坡沟系统侵蚀产沙差异性

宇涛¹, 张霞¹, 李占斌^{1,2}, 李鹏¹, 李聪³

(1. 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室(西安理工大学), 西安 710048;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,

陕西 杨凌 712100; 3. 河南黄河水文勘测设计院, 郑州 450004)

摘要: 以坡沟系统单元为研究对象, 利用室内降雨试验, 结合三维激光扫描和微地貌分析技术, 研究不同草带覆盖位置下坡沟系统侵蚀产沙差异性。结果表明: 一些布设在合适位置的草带能够在 $p < 0.05$ 水平上显著影响坡沟系统的径流量和产沙量。植被布设于坡面中下部比布设于坡面上部具有更好的水沙调控作用, 植被布设于坡面长度 60% 时, 径流量和产沙量分别减少 7.35% 和 62.93%, 直接拦沙功效优于蓄水减沙功效, 水土保持功效达到最优。植被布设于坡面下部时, 其侵蚀输沙过程的剧烈程度得到了缓解, 植被调控侵蚀发育的作用体现。植被布设于坡面中下部时, 下垫面仅有 52% 的区域发生侵蚀, 其侵蚀输沙过程的剧烈程度明显减少, 植被调控侵蚀作用有效限制了侵蚀发育。植被布设于坡面中部和中上部时, 加剧了侵蚀的发育程度。研究结果有助于更好地理解植被优化配置。

关键词: 草带覆盖位置; 坡沟系统; 侵蚀产沙差异; 水土保持功效

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)06-0022-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.06.004

Study on Difference of Erosion Sediment In a Slope-gully System Under Different Grass Strip Position

YU Tao¹, ZHANG Xia¹, LI Zhanbin^{1,2}, LI Peng¹, LI Cong³

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China (Xi'an University of Technology), Xi'an 710048; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water

Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Henan Yellow River Hydrological Survey and Design Institute, Zhengzhou 450004)

Abstract: In this study, the unit slope-gully system was used as the object, using indoor simulated rainfall experiments, combined with three-dimensional laser scanning technology and micro topography analysis technology, the difference of erosion sediment under different grass strip position was studied. The results showed that some rational grass strips ($p < 0.05$) influenced both runoff and sediment yield in the slope-gully system. The regulation functions on runoff and sediment with the grass strip on the middle lower part of the slope were generally clearer than those with grass on the upper part of the slope. The optimal position for grass strips in the slope-gully system was identified as 60% of the slope length. In this location, the grass strips could effectively reduce the runoff and sediment by 7.35% and 62.93%, respectively. The water storage function of the grass strip was weak; however, its direct sediment interception function was more effective, the water and soil conservation function was optimal. When grass strip was planted in the lower part of the slope, the severity of erosion sediment transport processes was eased, and the effect of grass strip on erosion was reflected. When grass strip was planted in the middle lower part of the slope, only 52% of the underlying surface was eroded, the severity of erosion sediment transport processes was eased significantly, the regulation of vegetation effectively controlled the erosion formation and development. When grass strip was planted in the middle part and middle upper part of the slope, extremely aggravated erosion development. The information of this study can be useful for better understanding the optimal vegetation pattern.

收稿日期: 2018-06-11

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于能量过程的坡沟系统侵蚀产沙过程调控与模拟”(41471226), “黄土高原生态建设的生态-水文过程响应机理研究”(41330858)

第一作者: 宇涛(1969—), 男, 陕西乾县人, 博士研究生, 主要从事水土资源保护与管理研究。E-mail: 2214060767@qq.com

通信作者: 张霞(1982—), 女, 内蒙古包头人, 博士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zhangxia20002000@163.com

Keywords: grass strip position; slope-gully system; erosion sediment difference; water and soil conversation function

土壤侵蚀是世界范围内复杂而又严重的生态环境问题^[1-3]。我国黄土区是全球范围内黄土厚度最大和分布面积最广的区域,尤其在黄土丘陵区,地形破碎复杂,土壤抗侵蚀能力较弱,降雨多以暴雨形式降落,土壤侵蚀严重且植被有限,导致生态脆弱,因此该区是泥沙进入黄河的主要源区^[4]。坡沟系统是构成黄土高原地区最重要的组成部分,其侵蚀主要包括3大过程:降雨与径流引发的土壤颗粒分散、剥离及泥沙输移和泥沙沉积。这3个过程之间并未相互独立,而是相互联系、相互转化及相互影响,研究和分析这些过程的影响与转化机制是揭示植被调控侵蚀作用机理的关键。

围绕黄土高原开展的植被调控侵蚀产沙的研究已经有相当长的历史,在多年的不断努力中,人类已经积累了大量植被调控侵蚀产沙的研究成果,对该调控机理具备了一定系统性和深入性的认识。然而,侵蚀产沙本身就是一项极其复杂的问题,受限于研究方法和测量工具、技术,在定量计算和识别坡沟泥沙的成因、坡面产沙的耦合因素、侵蚀产沙的阻碍机制等方面未能深入地进行系统的定量研究,使得坡沟侵蚀的研究受到制约。另外,围绕黄土高原地区,虽然已经广泛地对植被、降水量和侵蚀产沙作了大量研究,并广泛应用人工投入了稳定性较高的稀土元素示踪的方法^[5-6],但受限于观测资料的可靠性、长期性以及复杂的相互影响因素,未能有效进行观测和研究^[7],因此还未完成定量化^[8-10],加大了理解侵蚀的形成和演化机制与植被影响机制的难度^[11]。

黄土高原植被侵蚀产沙调控作用研究历史悠久,并且取得了许多进展。然而,由于侵蚀产沙领域问题的复杂性,研究手段和测量技术的限制,关于坡沟泥沙来源的定量识别与计算一直限制着坡沟系统侵蚀研究发展。同时,国内外学者对植被减蚀效应的研究仍处于定性的经验分析阶段,对植被拦截水沙过程以及其对径流侵蚀产沙作用机制的研究^[5-11]较少。现有的研究^[12-14]大多集中在坡面侵蚀产沙的特征和规律,对于整个坡沟系统的植被格局对侵蚀产沙的影响却鲜有研究。另外,虽然关于黄土高原地区植被空间配置和降雨对土壤侵蚀的影响已经开展了广泛的研究,但由于缺乏足够可靠的观测资料以及影响因素之间复杂的相互作用还未定量化^[9-10],使得侵蚀特征和植被对土壤侵蚀的影响机制很难理解^[11]。甚至更少的研究^[11]关注不同植被分布的调控作用机制和水土保持功效方面的差异。因此,开展黄土高原坡沟系统

的植被空间配置对土壤侵蚀产沙过程的作用机理研究,具有重要的科学和现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

根据坡沟系统地貌特征、室内试验条件和设计原则以及具体试验设施状况,对黄土高原丘陵沟壑区坡沟系统进行了概化,建立了地坡沟系统物理试验模型(图1)。所建物理试验模型基本表征黄土高原丘陵沟壑区坡沟系统的地貌特征。坡沟系统试验模型试验系统采用钢板制成。图1中采用坡度 12° 、长度为8 m的钢槽表示坡面,坡度 25° 、长度为5 m的钢槽表示沟道。整个钢槽的水平投影面积为 11.55 m^2 。坡面与沟道的长度比为 $1.6:1.0$,代表黄土高原地区坡面与沟道的实际比值^[12-14]。

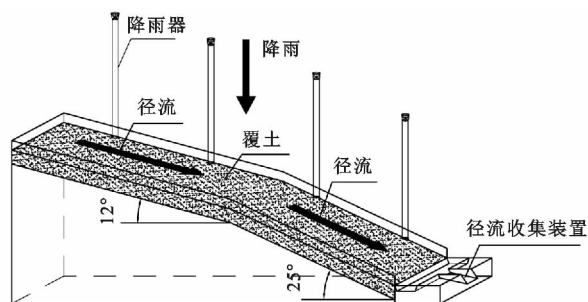


图1 坡沟系统概化模型示意

本次研究对象为陕北黄土高原丘陵沟壑区,以黄土作为试验用土壤,土壤样品为西安郊区黄土。粒径为 $0.05\sim 0.1, 0.002\sim 0.05 \text{ mm}$ 的颗粒分别占总量的 6.21% 和 91.39% 。根据美国农业部(USDA)的土壤分类标准,试验用土壤归类为粉质土。

试验开始前,首先在整个钢槽底部铺设厚度为20 cm的天然砂层,以保证试验用土的透水性接近于天然状态,并且确保土壤中的水分均匀渗透。为了确保试验初始条件的一致性,试验采用土壤夯实的方法,并在试验之前提前预湿。土壤容重控制在 1.3 g/cm^3 ,初始土壤含水量控制在 21% 。随后,在坡面范围内将4层5 cm的试验土壤层放置在砂层的上部,留出10 cm的空间用于覆盖草带。草带与裸露的斜坡部分齐平并紧密连接,以防止降雨期间草带滑动。试验选取适合于黄土区生长的野生马尼拉草(*Zoysia matrella*)作为试验用草,草带尺寸为 $2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$,根系深度为20 cm。试验开始2周前,将草带移植到钢槽内自然生长。

在室内人工模拟降雨试验中,采用自行设计的向上式模拟降雨装置产生降雨。采用滤纸法^[9]测量雨

滴直径,雨滴平均直径达到 1.5 mm,雨滴直径分布在 0.4~3.0 mm。因此,本次试验中的模拟降雨在雨滴尺寸和雨滴分布均与自然降雨类似^[15-16]。试验中每个喷头的降雨覆盖面积达到 3~4 m²,共使用 8 个喷嘴,其中 4 个位于坡面,4 个位于沟道。产生的雨滴有效降落高度为 6 m,以确保雨滴末速达到设计速度。降雨强度通过喷头尺寸和水压精确控制^[17],每次降雨试验前对降雨强度进行率定,以控制降雨量和降雨空间均匀性^[17]。

1.2 试验方法

根据现有的研究结果和研究区实际降雨雨强情况,试验采用的降雨雨强为 90 mm/h,相当于黄土高原地区中雨的降雨强度^[17-18]。本次试验采用人工模拟间歇性降雨,每种草带覆盖位置条件下共进行 2 场连续降雨试验,每次降雨间隔时间为 24 h。在试验控制条件下,根据实际观察,产流经过 30 min 后径流基本达到稳定状态,因此径流历时定为 30 min。每 1 min 用存储桶收集 1 次径流和泥沙样品,并对径流量进行测量。径流中的泥沙经过 24 h 静置后进行分离,并在 105 ℃ 高温下烘干 8 h,随后称重。

根据水土保持功能优化植被覆盖度的研究成果,考虑到黄土高原储水和干燥实际情况,最终确定植被覆盖度为 25%^[19]。在坡面范围内布设 5 种草带覆盖位置(图 2):坡面上部(位置 E)、坡面中上部(位置 D)、坡面中下部(位置 C)、坡面下部(位置 B)和裸坡(位置 A),而在沟道范围内不布设草带。

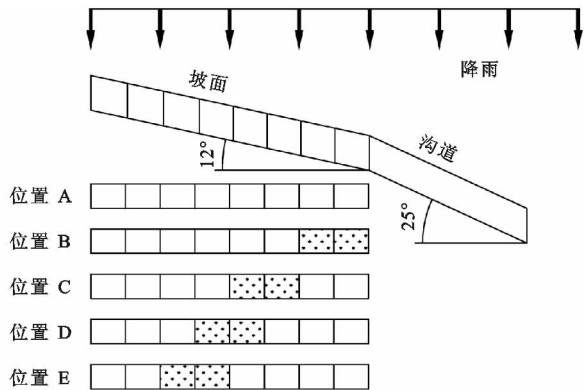


图 2 降雨试验坡面植被布设位置示意

1.3 地表微地貌测量

采用三维激光扫描仪(Trimble FX Scanner)对降雨前后的微地貌进行数字化,影像中的每一个像素点代表实际空间中的一个 3D 点。扫描仪水平方向测量精度为 1 mm,垂直测量精度为 0.02 mm。扫描仪所获取的空间点云数据的提取和处理由该仪器自带的扫描软件(Trimble Real Works Office)来完成。通过该套装软件可以建立试验中坡沟系统表面的(DEM)^[20]。在每次试验中,可以获取 2 次降雨前后

3 个 1 m×13 m 的下垫面地形的 DEM 数据。在此将初始 DEM 数据定义为“Rain 0”,第 1 次降雨后的 DEM 数据定义为“Rain 1”,以此类推。计算得出的各个草带覆盖位置下侵蚀指标与系统出口测量的产沙量相比,其误差为 6%~14%,表明地表微地貌测量结果是准确的。

2 结果与分析

2.1 坡沟系统不同草带覆盖位置的蓄水减沙效益

将裸坡条件下的径流总量和产沙总量作为参考值,其他草带覆盖位置条件下的径流总量和产沙总量与该参考值相比计算对应位置的蓄水减沙效益。由表 1 可以看出,不同草带覆盖位置的减沙效益大小依次为:位置 C>位置 B>位置 D>位置 E,即坡面中下部>坡面下部>坡面中上部>坡面上部。草带的蓄水效益与减沙效益基本类似,大小依次为:位置 C>位置 B>位置 E>位置 D,说明位置 E 的蓄水效益较位置 D 有所增加,与减沙结果相反。表明位置 C 的蓄水效益和减沙效益是试验条件下最优的即布设于坡面中下部位置的草带可以较好地发挥植被的水土保持功效,能够使径流量和产沙量分别减少 7.35% 和 62.93%。另外,试验观测结果发现,当植被布设于坡面上部和中上部时(位置 D 和 E),坡沟系统的土壤侵蚀更为严重,这与 Jin 等^[21]提出的在雨强为 65 mm/h 条件下低植被盖度会产生更高的土壤侵蚀的结论一致。

表 1 不同草带覆盖位置下 2 次模拟降雨的蓄水减沙效益

单位:%		
草带覆盖位置	蓄水效益	减沙效益
B	-7.99	12.68
C	7.35	62.93
D	-27.88	-48.29
E	-11.45	-56.89

从表 2 可以看出,不论是在第 1 次降雨还是在第 2 次降雨事件中,位置 C 的蓄水效益和减沙效益都是最优的。在位置 C 条件下,第 2 次降雨的径流量平均值与第 1 次降雨相比增加了 7.00%,产沙量平均值减小了 57.14%。在不同植被条件下,第 2 次降雨的径流量平均值与第 1 次降雨情况相比增加了 5%~37%,产沙量平均值减小了 42%~82%。因此,随着降雨场次的增加,径流量轻微增加但是产沙量却急剧减小,意味着第 2 次降雨条件下的侵蚀产沙量较小。这是由于在降雨后的侵蚀发育程度已经减缓并趋于成熟所致。植被的调控侵蚀作用显著影响着坡沟系统的径流过程与侵蚀产沙过程($p<0.05$),导致不同草带覆盖位置下的径流量和产沙量显著不同,尤其在第 2 次降雨中更是如此。因此,一些覆盖位置下的草带布设起

到了较好的减蚀效果。

表 2 不同草带覆盖位置下 2 场降雨的径流量和产沙量				
草带覆盖 位置	径流量/(L·min ⁻¹)		产沙量/(kg·min ⁻¹)	
	第 1 次降雨	第 2 次降雨	第 1 次降雨	第 2 次降雨
A	8.62±0.22b	11.24±0.36b	2.35±0.38b	1.36±0.10a
B	9.04±0.34b	12.40±0.24ab	2.59±0.34b	0.65±0.06b
C	8.41±0.31b	9.00±0.25c	1.21±0.12b	0.52±0.08b
D	12.40±0.65a	13.07±0.39a	6.41±0.88a	1.36±0.19a
E	9.88±0.42b	11.28±0.62b	6.42±0.97a	1.17±0.21a

注:表中数据为平均值±标准误;同列不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。

综合以上分析可知,当草带布设于坡面下部 60%位置处,具有试验范围内最好的水土保持效果;此时径流量减少 7.35%,产沙量减少 62.93%。说明此时草带的蓄水功效较弱,拦沙功效较强,草带更具有直接拦沙的水土保持功效。位置 C 下的草带布设对泥沙具有良好的拦截作用,即在合适位置布设草带具有较好的直接拦沙的水土保持功效,前期研究^[17]也证实了这一点。

当草带种植于距离坡面顶部相对较远的位置,如位置 B 和 C,草带对泥沙具有更高的拦截效率,能发挥出更好的水土保持功效。相反,将草带布设于靠近坡顶位置时,如位置 D 和 E,草带下部存在大范围裸露区域,产生更多径流与泥沙。因此,草带布设在靠近坡面底部的位置会对径流、泥沙产生较大的影响,能够大大降低径流对沟道的侵蚀能力;相反,草带的布设接近于坡面顶部,则对径流、产沙的影响较小。然而,试验结果也表明,并非将草带布设于坡面最底部(位置 B),其植被调控侵蚀的功效就是最优的,这不仅与坡沟系统特殊的变坡结构有关,还与上方水动力条件有关。

2.2 地表微地貌扫描合理性检验

研究采用初始状态下垫面高程数据减去第 2 次降雨后的下垫面高程数据(Rain 0—Rain 2),反映降雨后的侵蚀产沙量结果。由于植被覆盖会影响 DEM 观测结果,因此在数据处理中去除了草带部位的噪点数据。本研究采用 10 mm×10 mm 间距对原始 DEM 点云数据进行差值处理,计算各个草带覆盖位置条件下侵蚀产沙物质总体积,其数学表达式为:

$$V_E = \sum H_i S$$

(1)

式中: V_E 为侵蚀产沙物质总体积(L); H_i 为 DEM 点云数据点高程(mm); S 为面积(10 mm×10 mm)。

从图 3 可以看出,在不同草带覆盖位置条件下,第 2 次降雨后的侵蚀产沙总体积的排序与 2 场降雨后侵蚀产沙总量排序一致,皆为位置 E>位置 D>位置 A>位置 B>位置 C(表 2)。并将侵蚀产沙物质总体积与产沙量进行了函数拟合,拟合结果见图 4。其

拟合函数为 $V=31.19M+9.21$ (V 为体积(L); M 为产沙量(kg)),判定系数 $R^2=98.16\%$,表明本次研究中地表微地貌扫描结果以及微地貌分析技术的合理性和准确性。

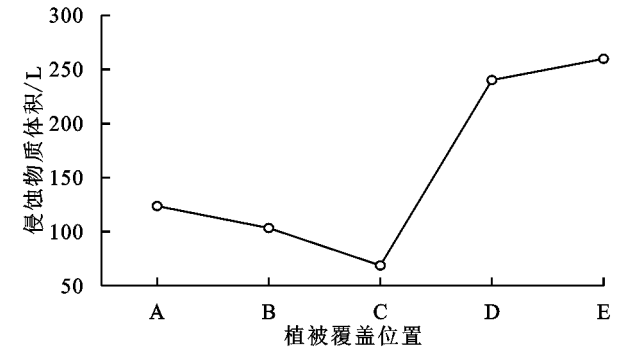


图 3 第 2 次降雨后不同草带覆盖位置下侵蚀物质体积

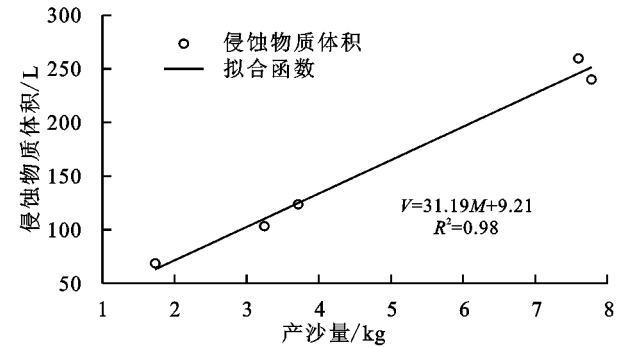


图 4 第 2 次降雨后不同草带覆盖位置下侵蚀物质体积与产沙总量回归分析

2.3 不同草带覆盖位置下侵蚀产沙物质高程分布

采用 SPSS 23.0 统计软件对获取的降雨前后下垫面高程差值数据进行统计分析,其统计结果见表 3 和图 5。在实际降雨侵蚀产沙的过程中,会伴随泥沙沉积的过程,按照 Rain 0—Rain 2 计算方法,正值“+”代表侵蚀,负值“-”代表沉积。

由表 3 和图 5 可以看出,2 次降雨后的下垫面高程差值的最小值均为负值,均值和中位数皆为正值,其高程分布大部分位于高程 0 m 之上,说明不同草带覆盖位置下降雨过程均伴随着泥沙的沉积和侵蚀,但主要以侵蚀输沙过程为主。不同草带覆盖位置下高程差值的均值大小依次为:E>D>B>A>C,与上述产沙量的排序结果基本一致。只是位置 A 和位置 B 稍有变化,裸坡 A 条件下的均值低于位置 B 的均值。究其原因:一是均值涉及到沉积(负值)作用的影响,不单单仅是侵蚀(正值)的影响;二是样本数案例数相差较大,均值和总值相差较大所致。

由表 3 中标准差和方差数据以及图 5 中的分散程度可以看出,DEM 差值数据的分散程度和侵蚀产沙均值数据排序一致,反映了侵蚀产沙的剧烈程度与侵蚀产沙量存在正比关系。位置 D 和 E 条件下,DEM 差值数据分散程度最大,上边缘和下边缘,即“须”的范围超出

了主体的范围,异常值和极端值的分布范围更是超越了“须”的范围,说明 DEM 差值数据波动剧烈,产沙过程剧烈。草带覆盖位置 A 的主体和“须”范围最小,但异常值和极端值范围接近于位置 D 和 E,最大值也接近于位置

D 和 E,表明其侵蚀输沙过程也十分剧烈;并且位置 A、位置 D 和 E 条件下的下四分位数基本都位于高程 0 m 之上或接近于 0 m 线,说明 3 种植被条件下 75% 的 DEM 差值数据都为正值,侵蚀发育十分剧烈。

表 3 不同植被格局条件下第 2 次降雨后下垫面高程差值统计

单位:mm

草带覆盖位置	平均数	中位数	方差	标准差	最小值	最大值	全距
A	8.1392	2.9735	565.184	23.7736	-29.7255	173.6143	203.3398
B	10.0183	7.6852	285.319	16.8914	-57.5511	105.2502	162.8013
C	2.4229	2.3434	141.053	11.8766	-46.1302	110.3256	156.4558
D	20.0050	7.6292	1459.395	38.2020	-56.5830	186.0587	242.6417
E	21.6217	20.2762	1099.559	33.1596	-32.9679	198.3808	231.3487

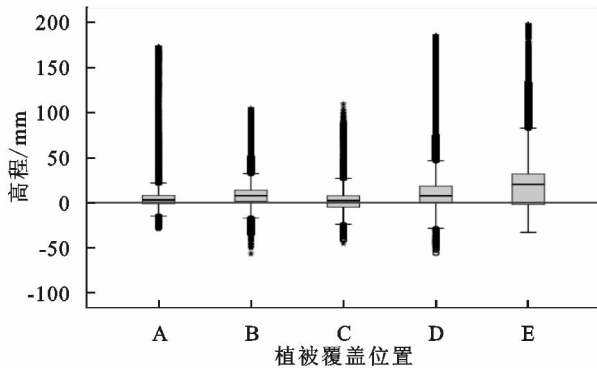


图 5 不同草带覆盖位置下第 2 次降雨后下垫面高程差值的箱图

位置 B 条件下,尽管 75% 的 DEM 差值数据都为正值,以侵蚀产沙为主,泥沙沉积为辅,但“须”的范围同主体范围接近,异常值和极端值的分布范围稍稍超越了“须”的范围,数据分散程度较小,说明草带覆盖位置 B 条件下侵蚀输沙过程的剧烈程度已经得到了缓解,植被调控侵蚀发育的作用已经开始体现。位置 C 条件下,仅有 52% 的 DEM 差值数据为正值,其“须”的范围与异常值和极端值的分布范围进一步缩小,数据分散程度最小,表明下垫面接近 1/2 区域以泥沙沉积为主,分布范围很广,其侵蚀输沙过程的剧烈程度已经有缓解的迹象,植被的调控侵蚀作用在一定程度上限制了侵蚀的发育。值得注意的是,尽管沉积面积达到 48%,分布范围很广,但具体的泥沙侵蚀与沉积程度以及植被调控侵蚀的作用强度还需要作进一步分析。但究竟何种植被条件下的侵蚀产沙量存在显著差异,需要对侵蚀物质高程数据进行进一步方差分析。

2.4 不同草带覆盖位置坡沟系统侵蚀产沙差异性分析

采用 SPSS 23.0 统计软件,对不同草带覆盖位置条件下第 2 次降雨后的侵蚀物质高程数据进行单因素方差分析。由方差分析结果可知,第 2 次降雨后侵蚀物质高程数据的 F 检验值远大于 1,说明组间方差远大于组内方差。此外,观察的显著性水平 sig 值为 0.00 远小于 0.05,因此可以拒绝原假设,即认为不同草带覆盖位置条件下,第 2 次降雨后的侵蚀物质高程数据均值存在明显

差异,说明不同草带覆盖位置对侵蚀产沙影响较大,在 $p < 0.05$ 水平上存在明显差异。

在试验范围内,对不同草带覆盖位置条件下的侵蚀物质高程数据进行方差分析,可以明确具体草带覆盖位置所带来的侵蚀产沙差异。由于本试验无重复设计,不能计算方差的齐次性,故采用 $S-N-K$ (Student-Newman-Keuls) 法进行均数之间的两两比较^[22], $\text{sig} < 0.05$ 表示差异显著。

由不同位置下侵蚀物质高程数据的多重检验后得出,侵蚀物质高程共分为 5 个均衡子集,第 1 均衡子集 (Subset=1 列) 仅包含位置 C,均数为 8.775 2,均数比较的概率 $p=1.00$,远大于 0.05,接受零假设,即可以认为位置 C 条件下侵蚀物质高程与其他位置的差异显著。第 2 均衡子集 (Subset=2 列) 包含位置 B 和 A,均数分别为 13.787 4 和 13.834 2,均数比较的概率 p 值为 0.740,远大于 0.05,即可以认为位置 B 和 A 条件下的侵蚀物质高程无明显差异,而与其他位置差异较为显著。第 3 均衡子集 (Subset=3 列) 仅包含位置 D,均数分别为 29.055 2,均数比较的概率 p 值为 1.000,远大于 0.05,即可以认为位置 D 条件下侵蚀物质高程与其他位置的差异显著。第 4 均衡子集 (Subset=4 列) 仅包含位置 E,均数分别为 34.023 6,均数比较的概率 p 值为 1.000,远大于 0.05,即可以认为位置 E 条件下侵蚀物质高程与其他位置的差异显著。

综合以上分析可知,由于草带覆盖位置的不同,不同位置的草带布设下侵蚀物质高程存在显著差异,说明不同草带覆盖位置条件下的侵蚀产沙量在 0.05 水平上存在显著差异。将侵蚀物质高程均值的差异组别分为 4 组,组内无明显差异,各组间差异较为显著。各组分别为:第 1 组,位置 C;第 2 组,位置 B、位置 A;第 3 组,位置 D;第 4 组,位置 E。

第 1 组至第 4 组侵蚀物质高程依次增大,组内侵蚀物质高程按前后顺序依次增大。

侵蚀物质的高程数据在一定程度上反映了各自草带覆盖位置条件下的侵蚀产沙量的大小。从侵蚀

物质高程差异性分析结果可以看出,不同草带覆盖位置条件下侵蚀产沙总量在 0.05 水平上存在明显差异。位置 C 条件下的侵蚀物质高程最小,同裸坡(位置 A)和其他草带覆盖位置差异显著,此时位置 C 条件下的侵蚀输沙过程的剧烈程度已经得到大幅度缓解,植被的调控作用有效控制了侵蚀发育。位置 B 虽然有草带的植入,其侵蚀物质高程均值与裸坡条件相比无显著差别,其均值稍有减小,表明此时侵蚀输沙过程的剧烈程度虽然得到了一定程度的缓解,调控侵蚀发育的作用较位置 C 稍弱,植被调控侵蚀作用有限,侵蚀产沙量并未有显著减少。位置 D 和 E 条件下,其侵蚀物质高程均值在 $p < 0.05$ 水平上明显高于其他草带覆盖位置,说明由于不合理的草带布设,其侵蚀发育程度更为剧烈(图 5),加剧了侵蚀发育程度。

3 结论

(1)当草带布设于坡面下部 60% 位置处,具有最好的水土保持效果,此时能够减少径流量 7.35%,减少产沙量 62.93%。草带的蓄水功效较弱,直接拦沙功效较强,草带更具有直接拦沙的水土保持功效。位于坡面下部的草带相比位于上部的草带具有更好的调控侵蚀的效果。坡沟系统中,并不是将草带越接近于坡面底部布设越好,此时并不会明显提高植被的蓄水减沙效益。

(2)不同位置的草带对侵蚀产沙影响较大,存在明显差异。植被布设于坡面下部时,其侵蚀输沙过程的剧烈程度已经得到了缓解,植被调控侵蚀发育的作用已经开始体现。植被布设于坡面中下部时,下垫面仅有 52% 的区域发生侵蚀,接近 1/2 区域以泥沙沉积为主,DEM 高程数据分散程度最小,其侵蚀输沙过程的剧烈程度明显减少,植被调控侵蚀作用有效限制了侵蚀发育。植被布设于坡面中部和中上部时,由于不合理的草带布设,其侵蚀发育程度更为剧烈。

参考文献:

- [1] De Baets S, Poesen J, Reubens B, et al. Methodological framework to select plant species for controlling rill and gully erosion; Application to a Mediterranean ecosystem Methodological framework to select plant species for controlling rill and gully erosion[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(10): 1374-1392.
- [2] Portenga E W, Bierman P R. Understanding earth's eroding surface with ^{10}Be [J]. *GSA Today*, 2011, 21(8): 4-10.
- [3] Xu G C, Zhang T G, Li Z B, et al. Temporal and spatial characteristics of soil water content in diverse soil layers on land terraces of the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2017, 158: 20-29.
- [4] 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.
- [5] Zhang X, Zhang Y, Wen A, et al. Soil loss evaluation by using ^{137}Cs technique in the Upper Yangtze River Basin, China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2003, 69(1): 99-106.
- [6] Ventura E J, Nearing M A, Norton L D. Developing a magnetic tracer to study soil erosion[J]. *Catena*, 2001, 43(4): 277-291.
- [7] 谭贞学,王占礼,王莎,等.黄土坡面细沟侵蚀过程[J]. *中国水土保持科学*, 2012, 10(6): 1-5.
- [8] Seeger M. Uncertainty of factors determining runoff and erosion processes as quantified by rainfall simulations[J]. *Catena*, 2007, 71(1): 56-67.
- [9] García-Ruiz J M. The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review[J]. *Catena*, 2010, 81(1): 1-11.
- [10] García-Ruiz J M, Regúés D, Alvera B, et al. Flood generation and sediment transport in experimental catchments affected by land use changes in the central Pyrenees[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 356(1/2): 245-260.
- [11] Allen G H, Joan Q W. Climatic influences on Holocene variations in soil erosion rates on a small hill in the Mojave Desert[J]. *Geomorphology*, 2004, 58(1): 263-289.
- [12] Benito E, Santiago J L, De Blas E, et al. Deforestation of water-repellent soils in Galicia (NW Spain): Effects on surface runoff and erosion under simulated rainfall[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28(2): 145-155.
- [13] Pan C Z, Shangguan Z P. Runoff hydraulic characteristics and sediment generation in sloped grassplots under simulated rainfall conditions[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 331(1): 178-185.
- [14] Pan C Z, Shangguan Z P. The effects of ryegrass roots and shoots on loess erosion under simulated rainfall[J]. *Catena*, 2007, 70(3): 350-355.
- [15] García-Ruiz J M. The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review[J]. *Catena*, 2010, 81(1): 1-11.
- [16] Best A C. The size distribution of raindrops[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1950, 76(327): 16-36.
- [17] Zhang X, Yu G Q, Li Z B, et al. Experimental study on slope runoff erosion and sediment under different vegetation types[J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(9): 2415-2433.

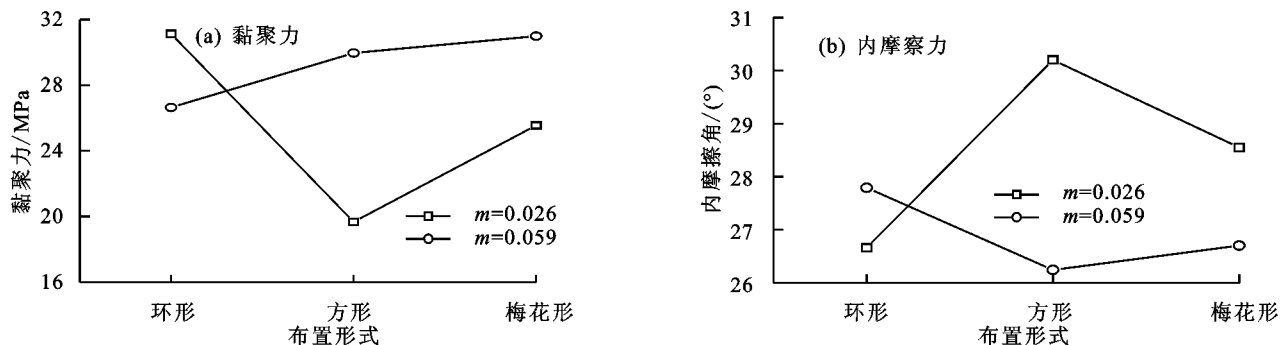


图 9 根—土复合体抗剪强度指标与根系布置形式关系

3 结论

(1) 根—土复合体试样的抗剪强度随含根量的增大而逐渐增加; 根—土复合体试样的黏聚力随着含根量的增加而逐渐增大; 根—土复合体试样的内摩擦角随着含根量的增加变化不明显;

(2) 在法向应力较小时, 根系的布置形式对根—土复合体的抗剪强度影响较小, 当法向应力较大时, 根系的布置形式对根—土复合体的抗剪强度影响不能忽略, 且面积置换率越大, 该误差越大;

(3) 根—土面积置换率的较小时, 方形布置的根系对黏聚力和内摩擦角影响最大, 随着根—土面积置换率的增加, 方形、梅花形及环形分布形式对根—土复合体黏聚力和内摩擦角的影响趋于稳定。

参考文献:

- [1] 王利民, 翁伯琦, 罗涛, 等. 山地水土流失的影响因素及其若干机理[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(19): 70-75.
- [2] 张同鑫, 潘毅, 张壮, 等. 加筋生态护坡技术的应用与发展[J]. 水利水运工程学报, 2017(6): 110-117.
- [3] 孙路遥. 植被护坡技术及其应用研究[J]. 路基工程, 2012(4): 189-191.
- [4] 肖高华, 范海军, 赵青, 等. CFT 生态双重网植植被护坡及其工程应用[J]. 公路工程, 2012, 37(2): 153-157.
- [5] 于小娟, 张涛. 航道植物生态护坡固土模式与结构稳定性研究现状及发展[J]. 四川建筑科学研究, 2014, 40(3): 144-148.
- [6] 张桂荣, 赵波, 饶志刚, 等. 土质岸坡生态防治技术研究

[J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(5): 87-91.

- [7] 岑国平, 洪传平, 李林, 等. 植被生长初期机场生态边坡抗冲刷性能[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(5): 99-104.
- [8] Bourrier F, Kneib F, Chareyre B, et al. Discrete modeling of granular soils reinforcement by plant root[J]. Ecological Engineering, 2013, 61(1): 646-657.
- [9] 胡其志, 周政, 肖本林, 等. 生态护坡中土壤含根量与抗剪强度关系试验研究[J]. 土工基础, 2010, 24(5): 85-87.
- [10] 胡文利, 李为萍, 陈军. 不同含水率水平下根—土复合体抗剪强度试验研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2011, 32(1): 215-219.
- [11] 李为萍, 史海滨, 胡敏. 沙地柏根系径级对根土复合体抗剪强度的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(4): 934-937.
- [12] 陈春晖, 晏鄂川. 植物根系对土体抗剪强度影响的研究[J]. 地质科技情报, 2012(4): 126-129.
- [13] 廖晶晶, 罗绪强, 罗光杰, 等. 3 种护坡植物根—土复合体抗剪强度比较[J]. 水土保持通报, 2013, 33(5): 118-122.
- [14] 栗岳洲, 付江涛, 胡夏嵩, 等. 土体粒径对盐生植物根—土复合体抗剪强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 403-412.
- [15] 黄钢, 彭晶, 肖衡林. 根系含量对土壤抗剪强度的影响[J]. 中国水土保持, 2016(5): 42-44.
- [16] 程洪, 颜传盛, 李建庆, 等. 草本植物根系网的固土机制模式与力学试验研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1): 62-65.
- [17] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准 (GB/T 50123—1999) [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.

(上接第 27 页)

- [18] Zhou J, Fu B J, Gao G Y, et al. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2016, 137: 1-11.
- [19] Rey F. Effectiveness of vegetation barriers for marly sediment trapping [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004, 29(9): 1161-1169.
- [20] Darboux F, Davy P H, Gascuel-Oudoux C, et al. Evolu-

tion of soil surface roughness and flow path connectivity in overland flow experiments [J]. Catena, 2001, 46(2): 125-139.

- [21] Jin K, Cornelis W M, Gabriels D, et al. Residue cover and rainfall intensity effects on runoff soil organic carbon losses [J]. Catena, 2009, 78(1): 81-86.
- [22] 卢纹岱. SPSS for Windows 统计分析 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.