不同植被格局对梁峁坡—沟坡的侵蚀动力作用机制

于国强[1], 贾莲莲[2], 朱冰冰[3], 张 霞[4]

〔1. 中国地质调查局干旱—半干旱区地下水与生态重点实验室, 陕西 西安 710054;
2. 黄河水利委员会黄河上中游管理局, 陕西 西安 710021; 3. 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710061; 4. 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), 陕西 西安 710048〕

摘 要:[目的] 探究不同植被格局对梁峁坡—沟坡的侵蚀动力作用机制,为进一步揭示草地坡面侵蚀规律和植被减蚀效应研究提供科学依据。[方法] 以梁峁坡—沟坡为研究对象,采用室内降雨模拟降雨和三维激光扫描技术,分析不同植被格局对梁峁坡—沟坡侵蚀动力作用机制。[结果] 径流流速和含沙量共同影响着坡面侵蚀动力过程,径流流速是主要影响因素。坡面的侵蚀产沙来源主要位于沟坡内,不同植被格局下梁峁坡与沟坡产沙比例的不同,反映了植被调控侵蚀的范围和强度的不同。草带位于梁峁坡中下部时,不但能够有效降低梁峁坡的侵蚀程度,而且能够有效抑制和减缓沟坡内的径流流速,大幅度降低梁峁坡下部和沟坡内的侵蚀程度。[结论] 不同植被格局可以通过影响径流流速和含沙量来调控梁峁坡—沟坡侵蚀动力。

关键词:植被格局;梁峁坡—沟坡;径流流速;侵蚀量

文献标识码:A **文章编号**:1000-288X(2020)04-0010-07 **中图分类号**:S157.1

文献参数:于国强,贾莲莲,朱冰冰,等.不同植被格局对梁峁坡—沟坡的侵蚀动力作用机制[J].水土保持通报,2020,40(4):10-16. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.04.002; Yu Guoqiang, Jia Lianlian, Zhu Bingbing, et al. Regulation mechanism of vegetation pattern on erosion dynamics in hill-gully slopes [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(4):10-16.

Regulation Mechanism of Vegetation Pattern on Erosion Dynamics in Hill-gully Slopes

Yu Guoqiang[1], Jia Lianlian[2], Zhu Bingbing[3], Zhang Xia[4]

〔1. *Key Laboratory on Groundwater and Ecology in Arid and Semiarid Regions, China Geological Survey, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*; 2. *Upper and Middle Yellow River Bureau, Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, Xi'an, Shaanxi* 710021, *China*; 3. *School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi* 710061, *China*; 4. *State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China (Xi'an University of Technology), Xi'an, Shaanxi* 710048, *China*〕

Abstract: [Objective] The regulation mechanism of different vegetation patterns on erosion dynamics in hill-gully slope was studied in order to provide a scientific basis for further revealing the law of erosion in grassland slope and the effects of vegetation on erosion reduction. [Methods] The regulation mechanism of different vegetation patterns on the erosion dynamics on a hill-gully slope was analyzed with rainfall simulation and three-dimensional laser scanning technology on a hill-gully slope model. [Results] Both runoff velocity and sediment concentration affected the dynamic process of slope erosion, and runoff velocity was the dominant factor. The gully-slope area was the main erosional sediment source. The scope and degree of vegetation regulation impacts with different patterns could be reflected by sediment yield ratios of hillslope to gully-slope. The grass strip located at the middle and lower part of the hillslope not only reduced the erosion degree effectively on the hillslope, but also retarded runoff velocity on the gully-slope greatly which would alleviate the erosion at the lower part of hillslope and gully slope. [Conclusion] Different vegetation patterns

收稿日期:2019-12-06 **修回日期**:2020-05-21

资助项目:陕西省创新能力支撑计划项目"旱区地下水文过程与表生生态重点科技创新团队"(2019TD-040);中国地质调查局项目(DD20190504);陕西省自然科学基础研究计划项目(2015JQ4099);国家自然科学基金项目(51779204;41601285)

第一作者:于国强(1979—),男(汉族),内蒙古自治区包头市人,博士,高级工程师,主要从事土壤侵蚀与水土保持等方面的研究。Email:yuguoqiang23@163.com。

regulate the erosion dynamics in hill-gully slope by affecting the runoff velocity and sediment concentration.
Keywords: vegetation pattern; hill-gully slope; runoff velocity; sediment yield

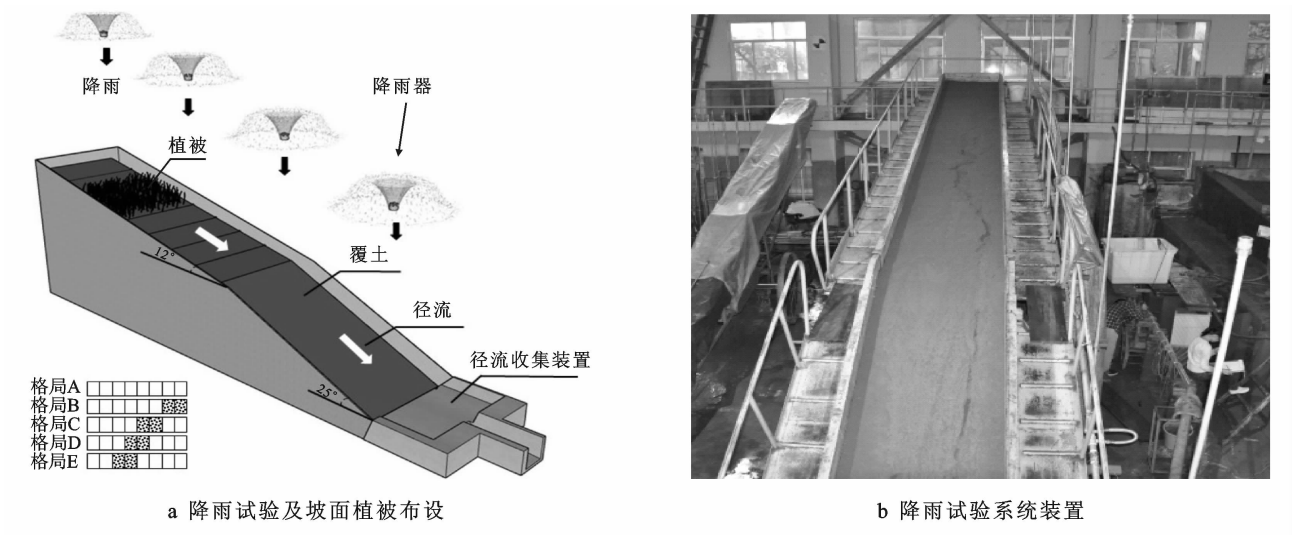
土壤侵蚀是黄土高原严重、复杂的生态问题[1-3]。我国黄土区地形破碎,土壤抗侵蚀能力弱,土壤侵蚀严重且植被有限,是泥沙进入黄河的主要源区[3]。植被在黄土高原生态环境建设中有着不可替代的作用,合理的植被结构能够有效减少、防止水土流失,改良土壤性质[4-6];不合理的植被布局加剧水土流失[7]。因此,如何优化植被格局是实现是治理黄土区水土流失的关键。黄土高原区植被与侵蚀的关系研究历史悠久,学者们[8]对植被盖度与土壤侵蚀的关系、植被对水力学参数和土壤性质的影响、植被的减水减沙效应等方面开展了大量研究。在植被调控坡面侵蚀研究方面,研究者们[9]认为除植被类型、数量决定侵蚀产沙外,格局、分布也同侵蚀产沙关系密切。不少研究[10-11]发现,在相同降雨或梁峁坡来水条件下,植被分布在沟坡的侵蚀产沙小于中坡和梁峁坡。从本质上说,草地植被是通过改变水力学参数进而影响土壤侵蚀过程的[8]。

近年来,国内外学者较为系统地研究了植被覆盖条件下的坡面流水动力学特性,然而,由于土壤侵蚀的复杂性和技术手段的限制以及缺乏合适的植被格局表征参数,导致现有研究多停留在定性分析阶段,只给出了不同植被分布与侵蚀产沙变化的逻辑关系,对植被分布对减流减沙的影响过程缺乏深入的阐述。梁峁坡—沟坡组成的复合坡形是自然界也是黄土高原区常见的主要坡形之一,对其侵蚀产沙规律及其调控机理的研究是认识流域产沙机制的基础。因此,本研究采用室内模拟降雨试验和三维激光扫描技术,通过分析黄土丘陵沟壑区梁峁坡—沟坡不同坡位植被坡面侵蚀动力过程变化,阐述植被及其格局变化对复合坡面侵蚀过程的调控作用,以期为进一步揭示草地坡面侵蚀规律和植被减蚀效应研究提供依据。

1　试验材料与方法

1.1　试验材料

本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,土壤样品为采自西安市郊区的黄土,属于丘陵台塬地貌,植被覆盖较好。本文根据概化的黄土丘陵沟壑区梁峁坡—沟坡地貌,建立了物理试验模型(如图 1 所示)。试验于 2017 年 4—7 月在西安理工大学雨洪侵蚀试验大厅进行。



a 降雨试验及坡面植被布设　　b 降雨试验系统装置

图 1　黄土丘陵沟壑区梁峁坡一沟坡概化模型

试验模型采用钢板制成,梁峁坡长 8 m,坡度 12°,沟坡长 5 m、坡度 25°,水平投影面积为 11.55 m^2[4]。试验用土为取自西安郊区丘陵台塬地貌的黄土,经筛分处理后 0.002～0.05 mm 和 0.05～0.1 mm 的颗粒分别占 91.39% 和 6.21%,为粉质土。选择草根系达 20 cm,长势较好的野生马尼拉草(*Zoysia matrella*)为试验用草。

试验开始两周前,将草带铺设于钢槽内自然生长,长势同自然生长状态下一致;草带铺设尺寸为 2 m×1 m。铺设土壤前,在钢槽底部铺设 20 cm 厚天然砂层,确保水分在土壤中均匀渗透。土壤初始含水量对黄土的抗侵蚀性影响很大,为确保每次试验初始值保持一致,每次模拟降雨试验都采用喷水装置对下垫面喷水,且喷水量和喷水时间相同,最终使模型的

初始含水量控制在21%左右。夯实土壤控制容重为1.3 g/cm³,每次试验初始条件保持一致。

土壤铺设厚度为20 cm,并为草带布设预留10 cm空间,使草带与裸坡紧密连接以防止滑动。模拟降雨采用向上式降雨装置,采用滤纸法[7]测量雨滴直径与自然降雨雨滴尺寸接近。试验中梁峁坡、沟坡分别布设4个喷头,每个喷头降雨覆盖3~4 m²。试验采用水压和喷头尺寸精确控制雨强、雨量和降雨均匀程度[12]。

1.2 试验方法

针对较为干旱环境和条件下的黄土高原地区植物实际生长情况[13],选择25%较低覆盖度作为试验设计。研究共涉及5种植被格局(图1):裸坡格局(格局A)、梁峁坡下部(格局B)、梁峁坡中下部(格局C)、梁峁坡中上部(格局D)、梁峁坡上部(格局E)。为确保各个格局下的相似性,每种格局下的初始条件(土壤条件、降雨雨强、历时)均保持一致,具体参数均保持一致。试验中选用黄土区的暴雨雨强(90 mm/h)[14],间隔24 h,每个格局开展2场试验。为减少试验误差,每场试验重复两次,重复结果表明,产沙和径流均值未发生显著差异,次降雨产沙量误差可以控制在10%以内。

每个格局降雨完成后,重新铺设新的草带根据预试验结果,产流达到稳定状态的时间为30 min,确定径流历时为30 min。试验过程中,径流、泥沙样品每1 min收集1次,测量径流量;泥沙经过24 h静置后分离,在105 ℃下烘干8 h后称重。将梁峁坡—沟坡均分为13个1 m×1 m的坡段,每个断面径流表面流速采用染料示踪法确定。

雷诺数Re是水流惯性力与黏滞力的比值。本试验层流和紊流的临界值取500,在500左右则为过渡流,Re大于500时为紊流,小于500则为层流[15],计算公式为:

$$\mathrm{Re}=\frac{UR}{v} \tag{1}$$

式中:R代表过水断面水力半径(m);U代表平均流速(m/s);v代表径流运动黏滞系数,$v=0.017\ 75/(1+0.033\ 7T+0.000\ 221T^2)$;$T$代表水温(℃)。

由于本试验坡面为薄层水流,可用坡面平均水深h代替水力半径R,用反算法计算:

$$h=\frac{q}{U}=\frac{Q}{Ubt} \tag{2}$$

式中:t代表时间(min);q代表单宽流量〔m³/(m·min)〕;Q代表t时间内总径流量(m³);b代表过水断面宽度(m);U代表平均流速(m/s)。

径流流速是坡面水流最重要、可以通过试验手段直接获取[16]的水动力学参数之一。坡面径流平均流速(V)计算式为:

$$V=\alpha U \tag{3}$$

式中:U为径流表面平均流速(m/s);α为修正系数,由径流流态确定,紊流、过渡流和层流时分别为0.80,0.70,0.67。

本试验选用Trimble FX scanner三维扫描仪,对下垫面微地貌进行扫描,水平方向和垂直方向测量精度均为1 mm,建立梁峁坡—沟坡表面DEM模型[17]。每种格局下获取3个1 m×13 m的DEM数据。去除植被的噪点数据后对获取的DEM点云数据进行10 mm×10 mm的插值处理,产沙总体积计算公式为:

$$V_E=\sum H_iS \tag{4}$$

式中:V_E为总侵蚀量;H_i为两次降雨DEM数据点高程之差;S为面积(10 mm×10 mm)。

为了增加三维激光扫描方法和空间插值分析方法的可靠性,本研究将将插值计算得到的侵蚀产沙物质总体积与系统出口测量的产沙量进行了对比分析,其拟合函数为:$V_1=31.19M+9.21$〔V_1为体积(L),M为产沙量(kg)〕,判定系数$R^2=98.16\%$,其误差在6%~14%之间,说明试验微地貌测量结果是可以接受的,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。

2 结果与分析

2.1 梁峁坡—沟坡植被格局的产沙与径流流速关系

流速是坡面径流最重要的水动力因素,影响泥沙输移和土壤侵蚀过程[18-19]。对降雨后各格局的坡段侵蚀量和径流流速进行汇总分析(见图2—3)。沟坡段的侵蚀量明显高于梁峁坡,不同格局的减沙效益以如下顺序递减:格局C>B>A>D>E,一些格局条件下(格局D和E)的产沙率和径流流速甚至超过了裸坡(格局A)。所有的产沙过程均皆存在波动,两次降雨条件下,梁峁坡—沟坡产沙沿程变化均表现出相似的波动趋势和程度。但格局A,B和C的输沙过程整体波动程度小于格局D,E。这是因为,格局B,C中植被位于梁峁坡下部,有效抑制了流速的快速增长,使得格局B,C在两次降雨中的流速均较小(见图2),径流动能一直处于较低水平,侵蚀能力减弱,梁峁坡各坡段的产沙水平一直低于裸坡。在沟坡范围内,格局C的径流流速始终处于较低水平,而且随着坡长的增加,这种现象更加明显。这表明此时草带对径流流速的调控范围可涉及整个坡面(见图2)。而格局B时未能很好的减缓流速增长,只能调控梁峁坡范围内的输

沙过程;此外,由于草带的过滤,进入沟坡范围内的含沙量降低,径流输沙能力变强,沟坡范围内侵蚀量高于裸坡(见图 2)。因此,格局 B 的草带布设对流速的减缓效果稍弱于格局 C。在沟坡范围内,格局 C 的径流流速始终处于较低水平,而且随着坡长的增加,这种现象更加明显。这表明此时草带对径流流速的调控范围可涉及整个坡面(图 3)。而格局 B 时未能很好的减缓流速增长,只能调控梁峁坡范围内的输沙过程;此外,由于草带的过滤,进入沟坡范围内的含沙量降低,径流输沙能力变强,沟坡范围内侵蚀量高于裸坡(见图 2)。因此,格局 B 的草带布设对流速的减缓效果稍弱于格局 C。

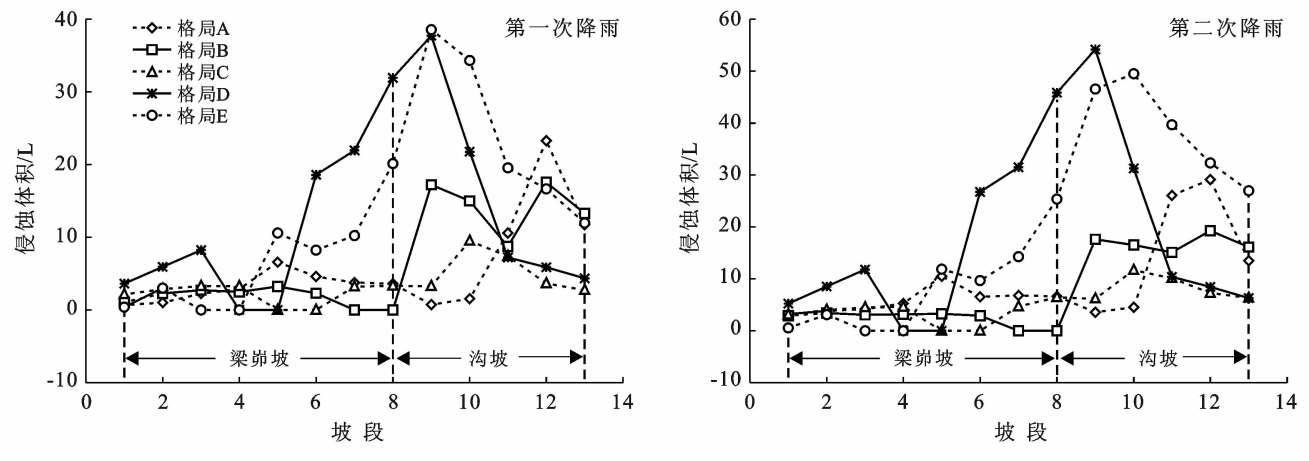


图 2　不同植被格局条件下梁峁坡—沟坡产沙沿程变化

格局 D,E 条件下,产沙波动和侵蚀程度远高于格局 B,C,甚至超过了裸坡的情况。这是由于:①草带位于梁峁坡上部,草带以下较大面积的裸坡成为了泥沙侵蚀空间和径流加速的空间,为径流侵蚀和加速提供了较大的空间;在此范围内,流速快速增长(见图 3),动能一直处于较高状态,径流侵蚀能力加剧,导致产沙率快速增长;②含沙径流经过草带的过滤后,含沙量降低,一方面增加了水流携运泥沙的能力,径流剥蚀率相对增大[18-20],另一方面,由于“清水”流速分布均匀且比“浑水”流速大,最终导致侵蚀程度加剧。在这种交互作用下,格局 D,E 的产沙率和径流流速始终最高,这与 Jin[21] 等提出的在雨强 65 mm/h 低植被盖度条件下会产生较裸坡更高的土壤侵蚀的结论一致。总体而言,不同格局下的坡面各个坡段的流速影响着对应坡段的侵蚀产沙水平。径流含沙量和流速即径流携运泥沙能力和径流剪切力共同影响着坡面侵蚀动力过程和侵蚀输沙过程[22-23],同时加剧或削弱径流侵蚀,径流流速在坡面侵蚀动力过程中为主要影响因素。植被通过对径流流速和含沙量的调节,实现了对坡面侵蚀动力过程的调控。

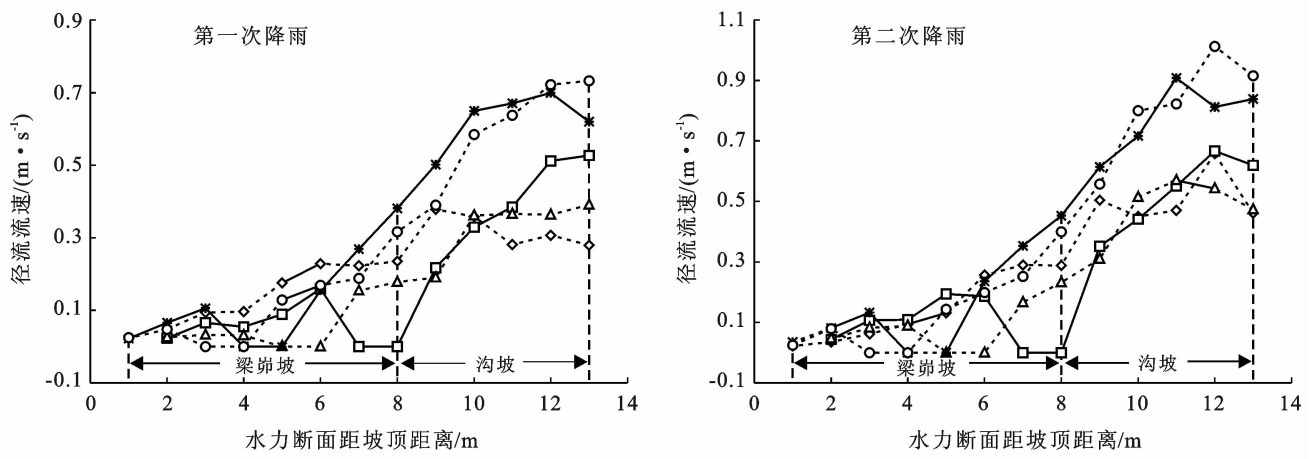


图 3　不同植被格局下梁峁坡—沟坡径流流速变化

2.2　植被格局对坡沟产沙关系变化的作用

由图 4 可以看出,除格局 D 外,各格局沟坡段侵蚀量均大于梁峁坡,说明沟坡是整个坡面主要产沙来源,径流对沟坡的侵蚀作用要强于梁峁坡。以梁峁坡

与沟坡的产沙比例的变化反映植被格局对侵蚀的调控范围和强度的变化(见图 4),相对于裸坡,格局 D,E 侵蚀泥沙量分别增加 116.44 和 136.14 L。表明格局 D,E 条件下,植被调控侵蚀的作用均已减弱甚至失效,或者在一定程度上加剧了径流侵蚀。如图 4 所示,格局 B 和 C 的坡面侵蚀量均低于裸坡,格局 B 下的梁峁坡产沙减少了 28.17 L,沟坡产沙增加了 7.83 L;格局 C 下的梁峁坡与沟坡的产沙分别减少了 19.70 和 35.30 L。这是由于草带布设缓解了径流的侵蚀作用。格局 C 缓解径流侵蚀的程度强于 B,两者侵蚀量相差 34.66 L。格局 B 下,较裸坡相比,梁峁坡产沙大量减少,减蚀量达 28.17 L,此时梁峁坡侵蚀量仅占整个坡面的 18%,达到谷值;但沟坡侵蚀量较裸坡增加 7.79 L,侵蚀量占整个坡面的 82%,侵蚀加剧程度主要集中在沟坡范围。说明此时草带仅对梁峁坡范围的侵蚀有效控制,并未在沟坡范围内发挥功效,或者作用稍弱。格局 C 的梁峁坡与沟坡的侵蚀量急剧减少,梁峁坡侵蚀量占 40%,沟坡占 60%,且坡面范围内的各坡段的侵蚀量均较低,说明此时草带可以很好的调控整个坡面范围内的侵蚀和输沙过程。

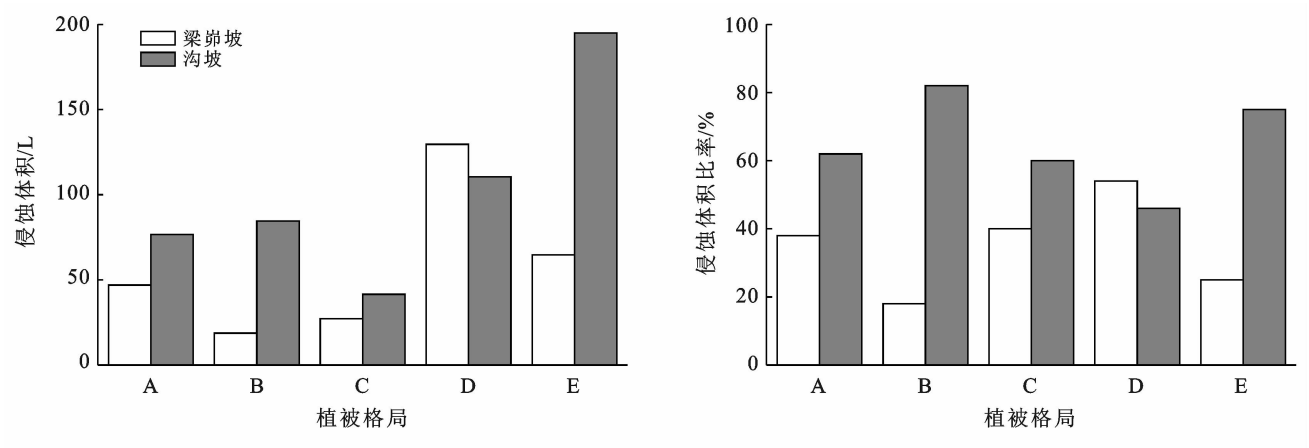


图 4 不同植被格局下梁峁坡与沟坡侵蚀量

3 讨 论

由于坡面侵蚀产沙过程的观测相对容易,土壤侵蚀的学者更多的关注的是坡面[25-26]。诸如 WEPP 模型和 RUSLE/USLE 模型,均是在坡面尺度的基础上向流域尺度推广的[27]。而植被由于其在坡面上的格局不同,对径流和泥沙的作用方式不同,坡面范围内的侵蚀产沙差异十分显著[28]。本研究将整个坡面分为 13 个坡段,每个坡段长 1 m,梁峁坡包括 8 个坡段(坡段 1—8),沟坡包括 5 个坡段(坡段 9—13),以表征每个坡段的侵蚀量。裸坡时,整个坡面的侵蚀量为 0.124 m^3,均值 9.52×10^{-3} m^3/m^2。坡段 5 的侵蚀量达到 1.05×10^{-2} m^3,占坡面侵蚀量的 8.48%,是梁峁坡主要侵蚀部位。沟坡范围内的中部至下部(坡段 11—13)是整个梁峁坡—沟坡范围内侵蚀最为严重的区域,3 m 长的坡段侵蚀量达到 0.069 m^3,产沙率为 29.80 kg/m^2,占整个坡面侵蚀量的 55.56%。格局 B 条件下,坡面侵蚀总量为 0.103 m^3,略小于裸坡,植被发挥出一定的减蚀作用,但效果较差。格局 B 下的梁峁坡侵蚀量仅为 0.019 m^3,占其总侵蚀量的 18.11%,侵蚀强度最低;但沟坡侵蚀量较裸坡有所增加,沟坡成为此时的侵蚀来源,侵蚀产沙多集中于此,侵蚀量为 0.085 m^3,产沙率为 22.01 kg/m^2,占整个坡面侵蚀量的 81.89%,说明此时草带减缓侵蚀的范围有限,仅可调控梁峁坡区域。格局 C 条件下,草带种植于梁峁坡 60%位置,坡面总侵蚀量仅为 0.069 m^3,远低于裸坡,说明该格局具有更好的控制侵蚀的作用,其植被控制区域覆盖全坡面;梁峁坡的侵蚀量仅为 0.027 m^3,占总侵蚀量的 39.57%;沟坡侵蚀量仅为 0.042 m^3,占整个坡面的 60.43%,侵蚀强度最低。此时只有沟坡中上部(坡段 10)和中部(坡段 11)侵蚀量较大,是坡面产沙的主要来源部位,其 2 m 的坡段的侵蚀量为 0.022 m^3,产沙率仅为 14.16 kg/m^2,占整个坡面产沙的 31.71%。

通过以上分析可知,草带种植于坡面,沟坡始终是坡面产沙的主要部位。植被种植位置梁峁坡上部会在一定程度上加剧侵蚀,使得侵蚀量达到峰值。不同格局下的加剧或减弱侵蚀的程度虽然一致,但其控制部位并不相同。格局 D,E 下的植被会加剧侵蚀,侵蚀量相近且达到峰值,侵蚀加剧程度相近;但此时植被所能作用的范围不尽相同,导致侵蚀的加剧程度、侵蚀的主要位置和泥沙主要来源有所区别。草带种植于梁峁坡中上部时,主要加剧梁峁坡范围内的侵蚀强度,而草带布设于梁峁坡上部则反而会加剧整个

沟坡范围内的侵蚀强度。格局 B,C 下,尽管不同程度上减缓了径流侵蚀,侵蚀量为最低;但植被调控侵蚀范围不同,侵蚀减缓部位截然不同。草带种植于梁峁坡底部,植被对侵蚀的调控范围有限,仅可以有效降低梁峁坡范围内的侵蚀强度,调控范围并未覆盖整个沟坡或者对沟坡的调控效果较弱,导致沟坡范围内的侵蚀量较裸坡有所增长。草带位于梁峁坡中下部,其植被的调控范围可以覆盖整个坡面,能够有效抑制和减缓沟坡内的径流流速,有效减缓整个坡面范围内的侵蚀强度,使坡面整体的侵蚀产沙处于试验范围内的最低水平。

诸多文献[29-30]表明,植被格局与植被的减沙减蚀作用息息相关,不同植被配置方式植被截流能力相差很大,坡面下部种植植被在减蚀方面明显好于坡面上部种植植被,这与本研究的结果一致。植被对坡沟侵蚀产沙调控效应的不同反映了不同植被格局的减水减沙效益。植被的水土保持效益随着覆盖度的增加而增大,相同覆盖度条件下,条带状、棋盘状格局都有不同程度的减缓径流流速的作用[31]。但本研究结果显示,坡面布设植被后,梁峁坡—坡沟反而侵蚀加重(格局 D,E),这说明植被的减沙效益与植被的布设位置有密切关系。以往结果表明,当植被位于下坡位时,其减沙效益远远高于上坡位和中坡位[11]。但随着坡面径流进入沟坡和沟道后,由于峁坡坡面径流含沙量减小,清水下沟反而使得进入沟坡的径流剥蚀力增大,沟坡部分侵蚀增强,即坡面径流通过沟坡时会引起侵蚀产沙量增加[25]。因此,研究不同梁峁坡植被格局对沟坡侵蚀的影响和调控将有助于深入理解黄土高原植被恢复背景下坡沟侵蚀产沙关系变化。

4　结 论

目前大多数关于坡面水力要素特征研究中,主要关注的是整个坡面水动力学特征的平均状况,忽略了水动力参数在侵蚀演化过程中的分布特征和以及同侵蚀产沙的响应关系。关于坡面流侵蚀力所引起的土壤分散—剥离—输移—沉积过程,植被格局对侵蚀输沙过程的调控作用的研究也存在一定的局限性。鉴于以上研究的薄弱之处,本研究开展了植被格局调控侵蚀动力的研究,得出以下结论:

(1) 径流流速和径流含沙量同向或反向影响着坡面的动力侵蚀过程和土壤侵蚀输沙过程,加剧和削弱侵蚀的作用同时存在。径流流速在坡面径流侵蚀过程中为主要影响因素。植被依靠对径流流速和径流含沙量的影响来调控坡面动力侵蚀过程和侵蚀输沙过程。

(2) 裸坡条件下梁峁坡与沟坡的产沙比例为 3∶5,沟坡是坡面泥沙来源的主要部位,径流对沟坡的侵蚀强度要大于梁峁坡。不同植被格局下,梁峁坡与沟坡的产沙比例出现不同程度的改变,基本以沟坡产沙为主。不同植被格局下的梁峁坡与沟坡的产沙比例反映出植被对侵蚀调控强度与作用范围的变化。

(3) 草带种植于梁峁坡底部,植被对侵蚀的调控范围有限,仅在梁峁坡范围内有效,并未覆盖沟坡或者对沟坡的调控效果较弱,仅可以有效降低梁峁坡范围内的侵蚀强度,导致沟坡段侵蚀有所增强。草带种植于梁峁坡中下部,可以有效减缓整个坡面的侵蚀强度,有效抑制和减缓沟坡内的径流流速,使坡面整体的产沙处于最低水平。

致谢:本文得到了自然资源部地下水与生态—陕西榆林野外科学观测基地的支持,在此表示感谢。

[参 考 文 献]

[1] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京:科学出版社,2004.

[2] García-Ruiz J M, Lana-Renault N, Begueria S, et al. From plot to regional scales: Interactions of slope and catchment hydrological and geomorphic processes in the Spanish Pyrenees [J]. Geomorphology, 2010, 120(3/4):248-257.

[3] Fu Bojie, Liu Yu, Lü Yihe, 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.

[4] Pan Chengzhong, Shangguan Zhouping. The effects of ryegrass roots and shoots on loess erosion under simulated rainfall [J]. Catena, 2007, 70(3):350-355.

[5] García-Ruiz J M. The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review [J]. Catena, 2010, 81(1):1-11.

[6] Nadal-Romero E, Lasanta T, Regüés D, et al. Hydrological response and sediment production under different land cover in abandoned farmland fields in a Mediterranean mountain environment [J]. Boletíndde la Asociación de Geógrafos Españoles, 2011, 201(55):303-323.

[7] Best A C. The size distribution of raindrops [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1950, 76(327):16-36.

[8] 张琪琳,王占礼,王栋栋,等. 黄土高原草地植被对土壤侵蚀影响研究进展[J]. 地球科学进展,2017,32(10):1093-1101.

[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] 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.

[11] 丁文峰,李勉.不同坡面植被空间布局对坡沟系统产流产沙影响的试验[J].地理研究,2010,29(10):1870-1878.

[12] Zhang Xia, Yu Guoqiang, Li Zhanbin, et al. Experimental study on slope runoff erosion and sediment under different vegetation types [J]. Water Resources Management, 2014,28(9):2415-2433.

[13] Rey F. Effectiveness of vegetation barriers for marly sediment trapping [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004,29(9):1161-1169.

[14] Zhou Ji, Fu Bojie, Gao Guangyao, 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(137):1-11.

[15] Li Grag, Abrahams A D, Atkinson J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow [J]. Earth surface Processes and Landforms, 1996,21(6):509-515.

[16] Pan Chengzhong, Shangguan Zhouping, Ma Lan. Assessing the dye-tracer correction factor for documenting the mean velocity of sheet flow over smooth and grassed surfaces [J]. Hydrological Processes, 2015,29(26):5369-5382.

[17] Darboux F, Davy P H, Gascuel-Odoux C, et al. Evolution of soil surface roughness and flow path connectivity in overland flow experiments[J]. Catena, 2001, 46(2):125-139.

[18] Nearing M A, Simanton R, Norton D, et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999,24(8):677-686.

[19] Wang Bing, Zhang Guanghui, Shi Yangyang, et al. Soil detachment by overland flow under different vegetation restoration models in the Loess Plateau of China [J]. Catena, 2014,116(5):51-59.

[20] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics(Ⅰ): Velocity relationships[J]. Transactions of ASAE, 1984,27(3):790-796.

[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] Wei Wei, Chen Liding, Fu Bojie, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China [J]. Journal of Hydrology, 2007,335(3):247-258.

[23] 张霞.黄土区地貌与植被格局的侵蚀动力过程试验研究[D].陕西 西安:西安理工大学,2018.

[24] Zhang Guanghui, Hu Jianjun. Effects of patchy distributed Artemisia capillaris on overland flow hydrodynamic characteristics [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2019,7(1):81-88.

[25] 王升,王全九,董文财,等.黄土坡面不同植被覆盖度下产流产沙与养分流失规律[J].水土保持学报,2012,26(4):23-27.

[26] 卫伟,贾福岩,陈利顶,等.黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应[J].环境科学,2012,33(8):2674-2679.

[27] Gumiere S J, Bissonnais Y L, Raclot D, et al. Vegetated filter effects on sedimentological connectivity of agricultural catchments in erosion modelling: A review [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2011,36(1):3-19.

[28] 邹军,张明礼,杨浩.退耕还林(草)与水土保持若干问题的研究进展[J].土壤通报,2012,43(2):506-512.

[29] 程圣东,李占斌,李鹏,等.不同草被格局坡面水土—养分流失动力过程试验研究[J].水土保持学报,2014,28(5):58-61.

[30] 吴秀芹,蔡运龙.土地利用/土地覆盖变化与土壤侵蚀关系研究进展[J].地理科学进展,2003,22(6):576-584.

[31] 陈浩,王开章.黄河中游小流域坡沟侵蚀关系研究[J].地理研究,1999,18(4):363-372.