

不同坡位的植被缓冲带对坡面侵蚀产沙来源的影响

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, 西安 710054;

2.黄河水利委员会 黄河上中游管理局, 西安 710021; 3.陕西师范大学 地理科学与旅游学院,

西安 710061; 4.西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘 要:为了研究植被对坡面侵蚀输沙的影响机制,采用模拟降雨试验,结合激光扫描方法,分析了不同坡位植被缓冲带下坡面产沙来源的变化特征。结果表明:没有植被覆盖时,坡面侵蚀最严重的区域位于下坡下部到中部,侵蚀产沙多来源于此。当植被种植于上坡中下部和下部时,坡面产沙主要来源于下坡中下部到中部,且侵蚀发育程度有所降低。随着植被缓冲带种植的位置上移,泥沙和径流的侵蚀和运动具有了更大的范围,坡面侵蚀最严重的区域也逐渐向上扩展,从下坡下部扩展到上坡中部,产沙量达到峰值,侵蚀严重程度增长 24%~45%。植被布设于上坡长度 60%时,其调控范围可覆盖整个坡面,产沙范围和侵蚀程度与裸坡相比分别降低 33%,53%,甚至改变了侵蚀方式,细沟侵蚀已经开始向片蚀转变,具有较好的侵蚀输沙调控作用。研究结果揭示了不同坡位的植被缓冲带可以通过影响侵蚀方式来调控坡面侵蚀产沙来源。

关键词:植被缓冲带;坡面;泥沙来源;产沙率

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)06-0009-05

Effect of Vegetation Buffers of Different Positions on Sediment Source in the Slope

YU Guoqiang¹, JIA Lianlian², ZHU Bingbing³, ZHANG Xia⁴

(1.Key Laboratory on Groundwater and Ecology in Arid and Semiarid Regions, CGS, Xi'an 710054, China;

2.Upper and Middle Yellow River Bureau, Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, Xi'an 710021, China; 3.School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710061, China; 4.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to study the effect mechanisms of vegetation on erosion and sediment transport, the artificial rainfall simulator and three-dimensional scanning technology were used to investigate the character of sediment sources in different positions of vegetation buffers. The results show that the main source of sediment yield is in section from the middle to the lower part of the downslope area where there is no vegetation, and the most serious erosion distributes in this area; the main region of sediment source is located in the middle lower part of the downslope and the whole downslope as the grass strip is laid in the lower part of the upslope and the middle lower part of the upslope where the erosion is alleviated; when the grass strip moves to the upper part of upslope, runoff flows longer and sediment yield has more sources, the main source area of erosion moves up simultaneously, which even extends from the lower part of the downslope area to the middle part of the upslope; the main erosion range increases by 2~3 times, and the degree of erosion increases by 24%~45%, the erosion sediment yield reaches the peak within the test range; when the planted grass strip occupies 60% of the upslope length, its regulation range can cover the entire slope, effectively controlling the main erosion range and degree are 33% and 53% lower than those of bare slope, respectively, which better controls the mechanism of erosion and sediment transport, more importantly, transforms the main

收稿日期:2019-12-03

修回日期:2020-03-11

资助项目:陕西省自然科学基金计划(2015JQ4099);陕西省创新能力支撑计划(2019TD-040);中国地质调查局项目(DD20190504);国家自然科学基金(51779204,41601285)

第一作者:于国强(1979—),男,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:yuguoqiang23@163.com

erosion pattern from rill erosion into sheet erosion; the regulation of vegetation on the processes of erosion and sediment transport is realized in the slope. The information indicated that vegetation in different positions of slope can regulate sediment source in a slope by affecting the erosion patterns.

Keywords: vegetation buffer; slope; sediment source; sediment yield rate

黄土高原的土壤侵蚀问题日益严重,生态矛盾日益突出^[1-2]。我国黄土区地形破碎,土壤抗侵蚀能力弱,植被有限,是入黄泥沙主要来源^[3]。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,如何合理布设植被,实现植被对水土保持效益最大化,是治理黄土区水土流失的关键。

植被在黄土高原生态环境建设中有着不可替代的作用,学者们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^[8]。在植被调控坡面侵蚀研究方面,研究者们认为除植被类型、数量决定侵蚀产沙外,位置、分布也同侵蚀产沙关系密切^[9]。不少研究发现,在相同降雨或上坡来水条件下,植被分布在下坡的侵蚀产沙小于中坡和上坡^[10-11]。然而,由于土壤侵蚀十分复杂且技术手段的限制,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^[12]。因此,本研究采用室内模拟降雨试验和三维激光扫描技术,通过分析不同坡位植被缓冲带坡面产沙来源的变化特征,阐述不同坡位植被带下坡面侵蚀的形态演变过程和差异,以期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

本研究根据黄土丘陵沟壑区坡面地貌形态,同时结合室内试验条件,构建坡面物理概念化模型。如图 1 所示,试验模型上坡长 8 m、坡度 12°、下坡长 5 m、坡度 25°^[6]。

本研究的试验用土壤为西安郊区丘陵台原地貌黄土,经过筛分处理。颗粒尺寸为 0.002~0.05 mm 的颗粒占 91.39%,0.05~0.1 mm 的颗粒占 6.21%,为粉质土。选用野生马尼拉草为试验草带,草根系长 20 cm,长势较好。试验开始 15 d 前,草带在试验钢槽内生长,按照模型尺寸,草带的尺寸设定为 2 m×1 m。试验槽底部铺设 20 cm 厚的天然砂。对钢槽内黄土进行夯实,使其容重在 1 300 kg/m³ 左右,通过喷水预湿的方法使土壤含水量在 20% 左右。然后在沙层上放置 20 cm 厚的土壤,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降雨时滑动。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],试验选择覆盖度为 25%,共设计 5 种植被位置(图 1):位置 a(裸坡)、位置 b(上坡下部)、位置 c(上坡中下部)、位置 d(上坡中上部)、位置 e(上坡上部)。

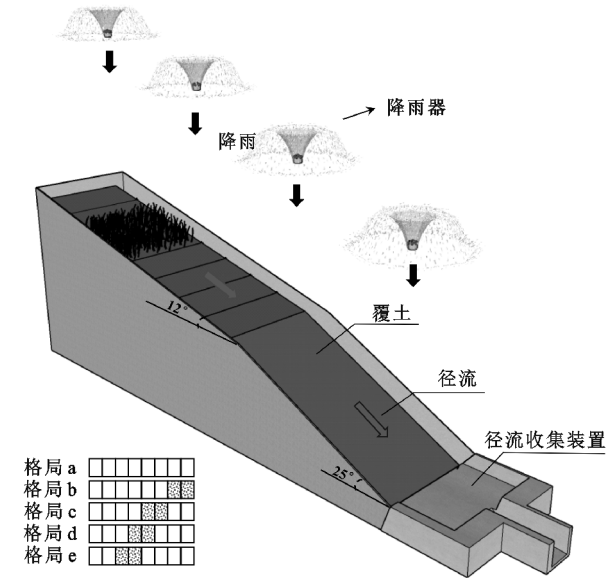


图 1 坡面概化模型

模拟降雨采用向上式降雨装置,滤纸法^[9]测量的雨滴直径与自然降雨雨滴尺寸接近。试验中上坡、下坡分别布设 4 个喷头,每个喷头的降雨面积达到 3~4 m²。试验采用喷头尺寸和水压力来准确控制雨强、雨量和降雨均匀程度^[13]。试验中选用黄土区的中雨雨强(90 mm/h)^[13-15]、间隔 24 h 的间歇性降雨,每个位置开展 2 场试验。为减少试验误差,每场试验重复 2 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。根据产流达到稳定状态的时间,确定径流历时为 30 min。试验进行时,水沙样品每 1 min 采样 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。

将坡面均分为 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。雷诺数由径流深、径流平均流速和动力粘性系数(与温度有关)计算。根据径流流态对流速进行修正,最终求得平均径流流速^[13]。

使用扫描仪测量降雨前、后坡面三维地形。测量精度为 1 mm,进而建立试验中坡面表面 DEM^[16]。每种位置下共扫描 3 个 DEM 数据(1 m×13 m),见图 2。

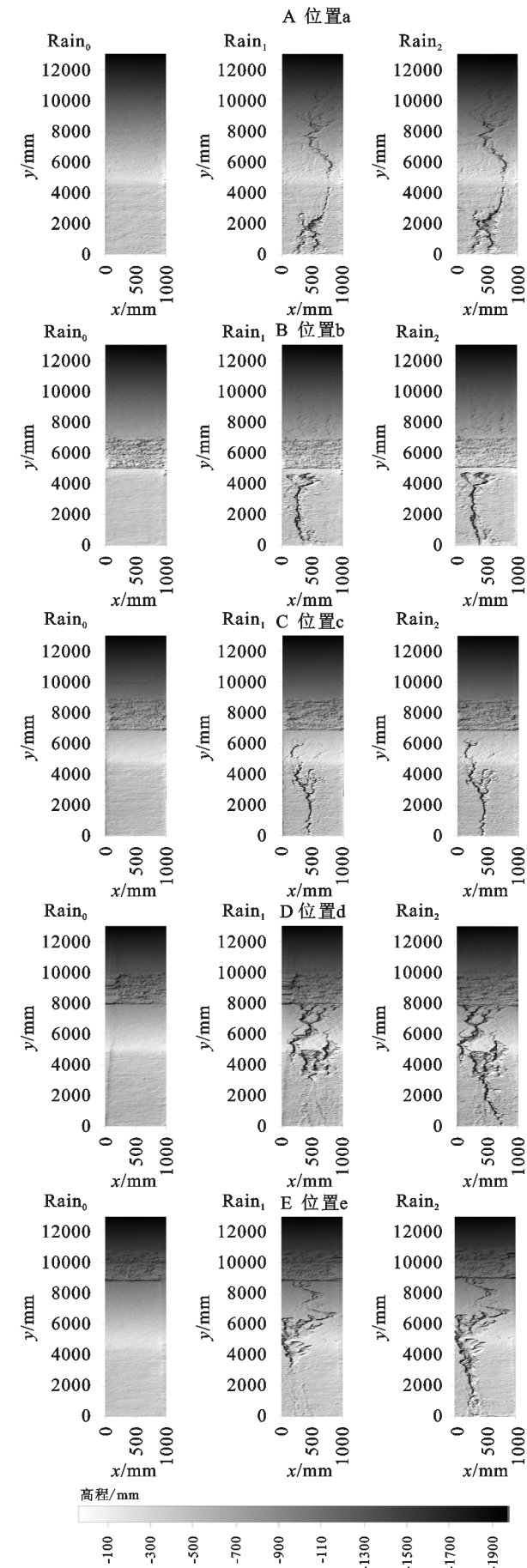


图 2 不同草带位置降雨前后 DEM 结果

将初始降雨前 DEM 记为“Rain₀”,第 2 次降雨后的 DEM 标为“Rain₂”。第 2 次降雨后的产沙量为 Rain₁—Rain₂。下垫面的草带会影响 DEM 测试数据,需要去除植被的噪点数据。对获取的 DEM 点云数据进行插值处理,插值间距为 10 mm × 10 mm。产沙总体积计算如下:

$$V_E = \sum H_i S \tag{1}$$

式中:V_E 为产沙体积;H_i 为 DEM 高程;S 为面积,规格为 10 mm × 10 mm。

由图 2 可以看出,在有、无草带的情况下,第 2 次降雨后的下垫面 DEM 较第 1 次降雨后变化不大,按照公式(1)计算得到的 2 次降雨的侵蚀体积变化幅度轻微,因此在后续的结果分析中,仅采用第 2 次降雨后的数据进行研究。

2 结果与分析

2.1 不同植被位置下坡面侵蚀输沙来源辨析

坡面从坡顶至坡底每 1 m 为一个坡段,上坡为“坡段 1—8”的 8 个坡段;下坡为“坡段 9—13”的 5 个坡段。以每个坡段产沙体积表征侵蚀量(产沙量),第 2 次降雨后各坡段产沙体积计算结果见表 1。

表 1 第二次降雨后各个植被位置下不同坡段产沙体积

范围	坡段	产沙体积/10 ⁻³ m ³				
		位置 a	位置 b	位置 c	位置 d	位置 e
上坡	1	3.2	2.9	3.1	5.2	0.5
	2	3.8	3.4	4.0	8.5	3.1
	3	4.2	3.1	4.5	11.8	—
	4	5.3	3.2	4.6	—	—
	5	<u>10.5</u>	3.3	—	—	<u>11.9</u>
	6	6.5	2.9	—	<u>26.7</u>	<u>9.7</u>
	7	6.8	—	4.7	<u>31.5</u>	<u>14.3</u>
	8	6.6	—	6.4	<u>45.9</u>	<u>25.4</u>
下坡	9	3.6	<u>17.6</u>	6.2	<u>54.2</u>	<u>46.6</u>
	10	4.5	<u>16.5</u>	<u>11.7</u>	<u>31.3</u>	<u>49.5</u>
	11	<u>26.1</u>	<u>15.1</u>	<u>10.1</u>	<u>10.4</u>	<u>39.7</u>
	12	<u>29.1</u>	<u>19.3</u>	7.3	8.4	<u>32.3</u>
	13	<u>13.6</u>	<u>16.2</u>	6.3	6.3	<u>27.1</u>
合计		123.7	103.4	68.7	240.2	259.9

注:—代表该部位为草带,下划线代表侵蚀严重部位。

裸坡条件下,整个坡面的产沙体积为 0.123 72 m³,均值 9.52 × 10⁻³ m³/m²。第 5 坡段的侵蚀量是 1.048 × 10⁻² m³/m²,达到坡面产沙量的 8.48%,是上坡主要产沙部位。下坡范围内的中部、中下部以及下部(坡段 11—13)是整个坡面范围内侵蚀最为严重的部位(图 2),3 m 长的坡段产沙体积为 6.876 × 10⁻² m³,产沙率为

29.80 kg/m²,占整个坡面产沙量的 55.56%。

位置 b 条件下,坡面侵蚀总体积为 0.103 38 m³,略小于裸坡时的 0.123 72 m³,植被具有一定的减缓侵蚀的作用,但作用较弱。位置 b 下的上坡产沙量在所有试验场次中最少,为 1.88×10⁻² m³,占整个坡面产沙量的 18.11%,侵蚀程度最低。但下坡产沙量较裸坡却有增加,主要的侵蚀区域集中于下坡整个 5 m 的坡段,产沙多集中于此(图 2),侵蚀体积为 8.466×10⁻² m³,产沙率为 22.01 kg/m²,占整个坡面产沙量的 81.89%,这说明草带调控(减缓)侵蚀的范围有限,仅对上坡有效果。与此相反,位置 c 条件下,草带布设于上坡 60%位置,整个坡面的产沙体积仅为 6.872×10⁻² m³,小于裸坡时的 0.123 72 m³,说明植被种植位置较为合适,就可以具有较好的减缓侵蚀的作用,其调控范围覆盖整个坡面。上坡产沙体积仅为 2.719×10⁻² m³,占整个产沙量的 39.57%;下坡产沙量仅为 4.153×10⁻² m³,占整个坡面的 60.43%,侵蚀程度最低。只有下坡中上部(坡段 10)和中部(坡段 11)产沙量较大,是坡面产沙的主要来源部位(图 2),其 2 m 的坡段的侵蚀体积为 2.179×10⁻² m³,产沙率仅为 14.16 kg/m²,占整个坡面产沙的 31.71%。

位置 d 条件下,整个坡面的产沙体积达到 0.240 16 m³,远大于裸坡,侵蚀的程度增强,草带减缓侵蚀效果较差,甚至失去调控效果。此时上坡、下坡的侵蚀程度均较为严重。从下坡中部至上坡中下部 6 m 范围内的侵蚀程度十分严重(图 2),侵蚀产沙多来源于此,其产沙量达到 0.199 87 m³,产沙率为 43.30 kg/m²,占坡面产沙量的 83.22%。

位置 e 与位置 d 侵蚀情况类似,但侵蚀剧烈程度强于位置 d,整个坡面的产沙体积达到了 0.259 86 m³,远远大于裸坡,植被减缓侵蚀的效果最差。此时从下坡下部一直延伸至上坡中部 9 m 范围内的侵蚀程度达到试验范围内峰值,侵蚀严重,其产沙体积高达 0.256 25 m³,产沙率增至 37.01 kg/m²,占坡面产沙总量的 98.61%,侵蚀程度和产沙量达到峰值。

2.2 不同植被位置调控坡面侵蚀输沙作用辨析

对不同植被位置下的 DEM 进行提取^[17],测量、计算第 2 次降雨后的产沙体积等侵蚀强度指标(表 2)。与裸坡相比,位置 b 条件下的细沟体积和产沙体积分别减少了 32%,16%,细沟宽度减少 30%,细沟深度降低 39%。而位置 c 与裸坡相比各个指标均大幅降低,细沟体积降低 69%,产沙体积降低 44%;细沟宽度减少 36%,深度降低 58%,达到谷值。位置 d 和 e 的情况则刚好相反,较裸坡相比,侵蚀程度大幅加剧,位置 d 的细沟体积和产沙体积分别增加 1.67 倍和 94%,最

大细沟深度和宽度分别增加 7.5%和 1.46 倍;位置 e 的产沙体积和细沟体积分别增加 1.1,1.98 倍,细沟深度增加 14%,宽度增加 1.56 倍达到峰值。

表 2 第二次降雨后不同植被位置下的侵蚀强度指标

指标	位置 a	位置 b	位置 c	位置 d	位置 e
细沟体积/10 ⁻³ m ³	68	46	21	182	204
产沙体积/10 ⁻³ m ³	124	103	69	240	260
最大细沟宽度/mm	218	153	91	536	558
最大细沟深度/mm	173	105	110	186	198

对比 5 种植被位置,草带位置 d 和 e 下的细沟侵蚀量占总侵蚀量的 76%,78%,远大于其他位置的情况,这与文献记载结论一致^[18]。说明草带位置 d、e 条件下,细沟侵蚀成为了主要的侵蚀方式,细沟侵蚀部位(侵蚀产沙来源)多处于下坡下部至上坡下部(图 2)。草带位置 b 和 c 下的细沟侵蚀量达到谷值,不到总侵蚀量的 45%,说明此时主要的侵蚀方式是击溅侵蚀和片蚀,而不再是细沟侵蚀,细沟侵蚀也仅仅发生在下坡下部的小区域内(图 2)^[19]。

在合理的位置条件下,尽管草带没有改变侵蚀部位,但能够减缓侵蚀,降低了侵蚀强度。值得注意的是,位置 b 和 c 的草带减缓侵蚀的程度和作用范围是不同的。位置 b 的草带调控侵蚀的效果稍弱于位置 c,调控范围仅限于上坡,其范围内的产沙量很小;但下坡范围内产沙量却超过了裸坡。此时下坡成为侵蚀的主要部位,产沙体积为 8.466×10⁻² m³,占整个坡面的 82%。位置 c 时草带调控侵蚀的效果更加明显,调控侵蚀范围从下坡至上坡,有效减少了坡面所有坡段的产沙水平,侵蚀强度指标处于谷值(图 2 和表 2)。将坡面产沙的主要部位控制在下坡中上部和中部 2 m 的坡段,使得产沙率仅为 14.16 kg/m²,产沙体积仅为 2.179×10⁻² m³,占坡面产沙的 31.71%。

尽管位置 d、e 的植被减缓侵蚀效果、范围不同,但产沙主要部位均是由下坡中部、中下部逐渐向上扩展至下坡上部至上坡下部、中部。同时由于位置 d、e 时草带布设相对靠上,留给了植被下部更多的裸坡与出口直接相连,流速快速增长,侵蚀能力急剧增大。加之植被过滤,含沙量有所降低,径流携运泥沙能力增强^[20],使得侵蚀程度(产沙量)增加,产沙的主要部位也因此发生改变,各个侵蚀指标较裸坡均有一定程度的增加(表 2)。

综合以上分析,草带种植于坡面,下坡始终是坡面产沙的主要部位。植被种植位置偏于上坡上部会在一定程度上加剧侵蚀,使得产沙量达到峰值;但由于植被减缓侵蚀的部位和调控的范围有所不同,侵蚀

加剧的程度和泥沙主要来源存在不同。草带种植位置偏于坡面下部,都会减缓侵蚀,产沙量为最低;但减缓的侵蚀范围不同,侵蚀主要的部位也会不同。草带种植于上坡底部,植被减缓侵蚀的范围有限,仅可以有效降低上坡范围的侵蚀,而下坡的产沙量较裸坡有增长(图2)。草带种植于上坡中下部,植被减缓侵蚀的范围达到整个坡面,可以在较大程度上抑制流速的增长,减缓整个坡面的侵蚀强度,使产沙量达到最低。

3 结论

裸坡条件下,下坡中部、中下部、下部3 m的坡段是坡面的主要产沙部位,产沙体积 $6.876 \times 10^{-2} \text{ m}^3$,产沙率 29.80 kg/m^2 。植被位于上坡下部或中下部时,下坡中部、中下部为主要泥沙来源,侵蚀程度得到缓解。当草带位于上坡中部、中上部时,泥沙侵蚀拥有了更多的裸露空间,泥沙来源部位逐渐向上扩展。同裸坡相比,主要侵蚀范围增加2~3倍,产沙率增至 $37.01 \sim 43.30 \text{ kg/m}^2$,增加幅度达 $24\% \sim 45\%$,侵蚀程度进一步加剧,产沙量达到峰值。

当草带在上坡下部和中下部布设时,虽然没有改变裸坡时的主要侵蚀部位,但却抑制、缓解了侵蚀强度。当草带种植于上坡下部60%位置,可以有效减缓整个坡面的侵蚀强度,进一步降低了各个细沟侵蚀指标,甚至改变了侵蚀方式,调控范围可覆盖整个坡面,有效地将主要的产沙范围控制在下坡中上部和中部2 m的坡段部位;使得主要产沙范围和产沙率较裸坡分别降低33%,53%。

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] Fu B J, Chen L, Ma K, et al. The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the Loess Plateau in northern Shanxi, China[J]. *Catena*, 2000,39(1):69-78.
- [3] 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):248-257.
- [4] García-Ruiz J M. The effects of land uses on soil erosion in Spain: a review[J]. *Catena*, 2010,81(1):1-11.
- [5] Nadal-Romero E, Lasanta T, Regúes D, et al. Hydrological response and sediment production under different land cover

in abandoned farmland fields in a Mediterranean mountain environment [J]. *Boletín de la Asociación De Geógrafos Españoles*, 2011,101(55):303-323.

- [6] 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.
- [7] 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.
- [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] Best A C. The size distribution of raindrops[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1950,76(327):16-36.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Rey F. Effectiveness of vegetation barriers for marly sediment trapping [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2004,29(9):1161-1169.
- [16] Darboux F, Davy Ph, Gascuel-Oudou C, et al. Evolution of soil surface roughness and flowpath connectivity in overland flow experiments[J]. *Catena*, 2002,46(2):125-139.
- [17] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面细沟形态变化及其与流速之间的关系[J].*农业工程学报*,2014,30(11):110-117.
- [18] Shen H O, Zheng F L, Wen L L, et al. An experimental study of rill erosion and morphology[J]. *Geomorphology*, 2015,231(15):193-201.
- [19] 张霞.黄土区地貌与植被格局的侵蚀动力过程试验研究[D].西安:西安理工大学,2018.
- [20] Nearing M A, Simanton R, Norton D, et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hill-slope[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999,24(8):677-686.