

# 华北土石山区草地过滤带布设方式对坡面产流产沙的影响

张金阁, 马岚, 张栋, 刘京晶, 黎俊佑, 孙占薇, 燕琳, 孙旭, 王福星

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

**摘要:** 为治理华北土石山区坡耕地水土流失, 提出坡面草地过滤带优化布设方式, 以该区典型的土壤石灰岩母质发育的褐土为研究对象, 在 9° 坡度、90 mm/h 雨强条件下, 利用室内人工降雨试验, 分析草地过滤带的布设方式(坡下片状、坡下条状、坡上片状、坡上条状)对坡面侵蚀的影响。结果表明: (1) 坡下条状布设方式可以有效延缓坡面初始产流时间, 相比其他 3 种布设方式初始产流时间延长了 1.3~1.6 倍, 且坡下条状布设方式可增加坡面径流入渗, 减少产流量, 在累计产流量上, 坡下片状 > 坡上条状 > 坡上片状 > 坡下条状。(2) 坡上布设方式下的累计产沙量是坡下布设方式的 10~23 倍, 坡上布设方式的产沙率随时间变化波动明显, 坡上布设方式下的产沙率是坡下布设方式的 3~35 倍, 当在坡下布设草地过滤带时对泥沙的削减效益最优。(3) 坡下布设可以抑制细沟侵蚀的发育, 坡下条状布设方式可以有效控制细沟产生的数量和沟长, 护坡效益最优。

**关键词:** 草地过滤带; 布设方式; 坡面侵蚀; 华北土石山区

**中图分类号:** S157.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2020)05-0076-05

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.05.011

## Effect of Grassland Filter Belt on Runoff and Sediment Yield on Slope in Earth-rocky Mountainous Area in North China

ZHANG Jinge, MA Lan, ZHANG Dong, LIU Jingjing, LI Junyou,

SUN Zhanwei, YAN Lin, SUN Xu, WANG Fuxing

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

**Abstract:** In order to control soil and water loss of sloping land in Earth-rocky Mountainous Area in North China, and to propose the optimal layout pattern of slope grass belt was put forward, the typical soil limestone parent material developed cinnamon soil in this area was taken as the research object. Under the condition of 9° slope and 90 mm/h rainfall intensity, the indoor artificial rainfall test was used to analyze the layout pattern of grassland filter belt (upslope, downslope, sheet, strip) on the slope. The results showed that: (1) The strip layout under the slope could effectively delay the initial runoff generation time of the slope, which was 1.3 ~ 1.6 times longer than the other three layout. And the strip layout under the slope could increase the runoff inflow and infiltration of the slope and reduce the runoff generation. As for the cumulative discharge, the upslope > strip > sheet > downslope. (2) The cumulative sediment yield under the arrangements on the slope was 10 ~ 23 times that under the arrangement on the slope. The sediment yield under the arrangement on the slope fluctuated obviously with time, and the sediment yield under the arrangement on the slope was 3 ~ 35 times that under the arrangement on the slope. The sediment reduction was the best when the grass filter belt was laid under the slope. (3) The layout under the slope could inhibit the development of rill erosion, and the strip layout under the slope could effectively control the number and length of rills, and the benefit of slope protection was the best.

**Keywords:** grass filter belt; layout pattern; slope erosion; earth-rocky mountainous area in north China

土壤侵蚀易造成环境污染, 使土地退化和生产力下降, 对人类社会可持续发展构成严重威胁, 已成为

全球性的环境问题之一<sup>[1-2]</sup>, 已有众多学者<sup>[3-8]</sup>研究通过布设植被过滤带来影响坡面侵蚀与产流产沙, 草地

过滤带是人为布设在坡面上的带状草地区域,可以阻碍径流,减弱径流的冲刷能力,加快径流下渗和吸收,使地表径流中的泥沙颗粒过滤、沉降。草地过滤带防止侵蚀的机理主要有2点:一是消除雨滴的动能,从根本上消除击溅侵蚀发生;二是草带的存在增大了地表有效糙率,使坡面流受阻,造成能量损耗<sup>[9-10]</sup>。已有研究<sup>[11]</sup>表明,在坡面上布设草地过滤带可以有效地延缓坡面初始产流时间、降低坡面径流系数、减弱径流侵蚀力,在一定的覆盖面积下坡面的径流流速、水深及挟沙能力有明显削弱,而且能够有效地促使泥沙的沉积<sup>[12]</sup>。关于草地过滤带对土壤侵蚀的影响一直受到研究人员的重视,研究众多,目前来看,有关草地过滤带的类型<sup>[13-14]</sup>、覆盖度<sup>[15-16]</sup>与坡面侵蚀关系相对清晰,但草地过滤带的布设方式与坡面侵蚀的关系仍然不十分明确,而该问题的解决不仅能促进坡面侵蚀模型的建立,也会更有利地指导水土流失防治,因此开展草地过滤带的布设方式对坡面侵蚀影响的研究具有重要的科学和现实意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

本试验于2019年5—8月在北京林业大学鹫峰人工模拟降雨实验室进行。试验采用长10 m,宽1.5 m,深0.6 m的土槽模拟自然坡面,根据调查野外实际地形,并考虑试验实际条件,将试验坡度设计为9°。选取了华北土石山区典型石灰岩母质发育形成的褐土进行试验,供试土壤容重为1.29 g/cm<sup>3</sup>,土壤中直径<20 μm的土粒占66.67%,直径>20 μm的土粒占33.33%。降雨器的有效降雨高度为12 m,可以使雨滴最终速度接近自然降雨,降雨均匀度均大于0.85,相关研究<sup>[17-18]</sup>发现,在90 mm/h雨强下降雨1 h,坡面细沟状态最终基本达到稳定,因此本试验在该条件下进行。

### 1.2 试验处理

为了使试验土壤的透水性和容重接近自然状态,在试验前的准备工作中,首先将10 cm厚的细沙填入土槽中,同时将试验用土过10 mm的土筛,然后将其分层填入土槽之中。

试验所采用的草地过滤带为每条长1.5 m,宽20 cm的塑料仿真草带,共10条,草带上的草平均高度为7 cm,主茎秆直径为1 mm。整个斜坡共10 m长,斜坡以坡中间5 m处为分界线,分为坡上和坡下2段(图1)。草地过滤带覆盖面积占坡面面积的20%,共有4种布设方式(图2),分别为坡下片状(DSH)、坡下条状(DST)、坡上片状(USH)、坡上条状(UST),其中条状布设处理设置每条草带间隔距离为30 cm,片状布设处理的草带间没有间隔距离,且衔接紧凑,

具体设置见表1。

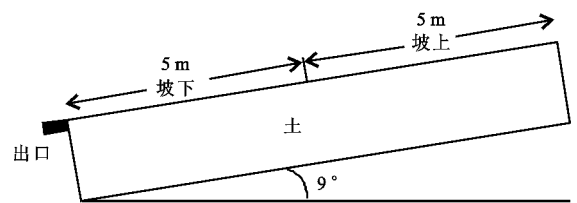


图1 试验土槽纵向剖面

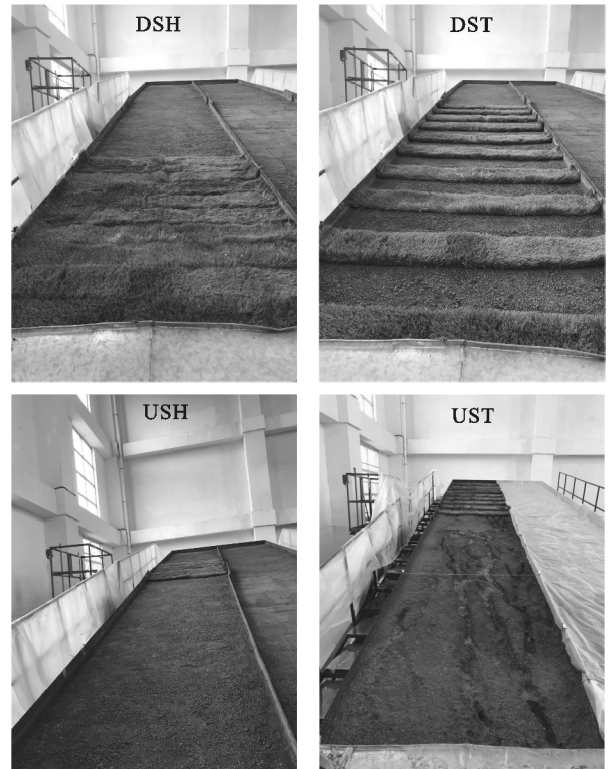


图2 草地过滤带布设方式

表1 草地过滤带布设参数

布设方式	布设参数
坡下片状(DSH)	草地斑块1块,布设于坡下(8~10 m)部位
坡下条状(DST)	草地斑块10块,布设于坡下(5~10 m)部位,每隔30 cm布设1条
坡上片状(USH)	草地斑块1块,布设于坡上(3~5 m)部位
坡上条状(UST)	草地斑块10块,布设于坡上(0~5 m)部位,每隔30 cm布设1条

试验采用间隔取样的方法测定所产生的径流泥沙,由于产流后的前10 min所产生的径流泥沙变化波动较大,所以前10 min在土槽出口每隔1 min接1 min的径流泥沙样品,之后每隔1.5 min接1 min的径流泥沙样品。采用高锰酸钾染色剂示踪法测定坡面流速。

试验数据采用Excel 2013软件进行统计分析,利用Origin 8.0软件进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 草地过滤带布设方式对坡面产流的影响

2.1.1 产流时间 由表2可知,从产流时间来看,DSH布设方式最先产流,其原因是降雨雨滴落在草

带的时候,并没有直接开始入渗,而是逐渐汇聚成小股水流,由于坡下片状草带临近土槽的出水口,所以由草地过滤带上汇聚成的小股水流最先流出。DST 布置方式的产流时间比其他 3 种布置方式延缓了 1.3~1.6 倍,这是由于坡面产生的径流在流经 DST 布置的草地过滤带时,会受到草带的层层阻截,每条草带都会对坡面径流产生滞留消能作用,而且间隔布置的方式使得坡下没有大面积的连续裸露区域,坡面水流难以汇聚成小股径流,减缓了其产流时间。

表 2 不同布置方式的产流特征

布置方式	产流时间/s	累计产流量/L	产流强度/ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )
DSH	185	895.74	1.00
DST	302	802.84	0.90
USH	235	837.52	1.02
UST	229	832.53	1.01

2.1.2 产流强度 在产流强度方面,DSH 的布置方式明显高于其他 3 种布置方式,这是由于随降雨时间的增长,坡面产流逐渐加大,径流在流经 DSH 草带的时候会形成固定的流路,绝大部分水流会汇聚到固定流路中,从固定流路中流出。而在 DST 布置方式下累计产流量及产流强度都是最小的,因为坡面径流在流经 DST 布置的草带时,流速会层层递减,每条草带都会对其产生滞流作用,使得入渗时间加长,而且不同于 DSH 的布置方式,DST 的布置方式使得坡上产生的径流在流经坡下草带的时候受到层层草带的消能作用,使得不会冲刷出固定流路,分流效果明显。而当草地过滤带布置在坡上的时候,累计产流量以及产流强度相差不大,因为坡上的布置方式对坡面产流的影响仅仅局限于坡上,其所起到的效益更多的是防止坡上区域受到的雨滴溅蚀,对坡面产生的径流影响较小。

2.1.3 产流率 由图 3 可知,4 种布置方式的产流率随时间变化呈现出较为相似的趋势。在前 15 min 内,从产流时刻开始,不同布置方式的产流率均随时间持续上升;在 15,40 min 内,产流率波动上升;在 40 min 以后产流率均趋于稳定。

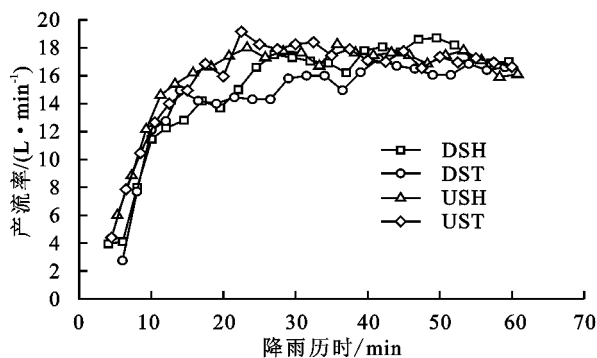


图 3 不同布置方式产流率随降雨历时变化过程

2.1.4 产流量 由图 4 可知,在 0,20 min 时间段内,坡下片状布置方式下的累计产流量占坡上片状的 75.64%,坡下条状布置方式下的累计产流量占坡上条状的 78.41%,坡下布置方式的累计产流量要少于坡上布置。这是由于径流由坡上流经坡下时,重力势能转化成动能,径流在坡下时的动能最大,而在坡下布置草带,可以很好地阻滞径流,减弱流速,增加径流入渗的机会。在 20,40 min 时间段,DST 布置方式的累计产流量要少于其他 3 种布置方式,分别占 DSH、USH、UST 布置方式产流量的 90.84%,86.71%,84.52%,原因是坡下条状的布置方式使得坡下没有大面积连续裸露区域,坡面产生的径流在流经草地过滤带的时候流速层层递减,难以冲刷出固定流路,分流效果明显,且随着泥沙在草带前的沉积,草带之间还会产生轻微的蓄水效应,增加坡面径流的入渗机会,使其在这一时间段的产流量少于其他 3 种布置方式。在 40,60 min 时间段,产流量最多的为坡下片状布置方式,随着降雨的进行,坡下片状布置方式所拦截的泥沙逐渐增多,泥沙在坡下淤积,这一阶段降雨产生的径流流经坡下片状草带的时候,会逐渐形成固定的径流线路,绝大部分的水流都是通过形成的固定流路直接快速流出,并没有较多的人渗量。

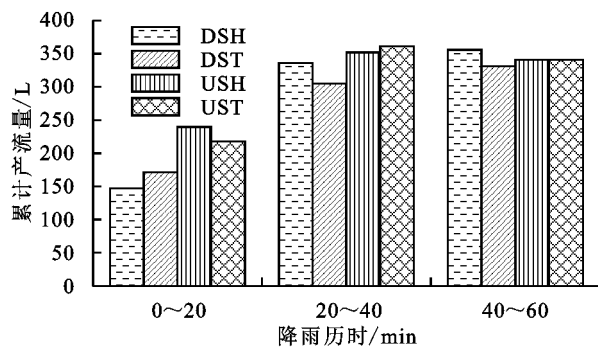


图 4 不同时间段内不同布置方式累计产流量

## 2.2 草地过滤带布置方式对坡面产沙和坡面形态的影响

2.2.1 产沙强度 由表 3 可知,坡上布置方式的累计产沙量以及产沙强度远大于坡下布置方式,累计产沙量是坡下布置方式的 10~24 倍,产沙强度是坡下布置方式的 10~23 倍。这是由于坡上布置方式对泥沙的削减作用只是局限于坡上产生的泥沙,当径流流出坡上布置的草地过滤带时,坡下无草地覆盖区域会受到径流的冲刷,产生的泥沙会被径流携带流出坡面,而在坡下布置草地过滤带时,坡下没有大面积裸露状态,径流受到草带滞留作用,降低了侵蚀能力,难以冲刷出侵蚀沟,泥沙在遇到坡下草带的时候会过滤、沉积下来,大大削减了泥沙量。



表 3 不同布设方式下的侵蚀产沙特征

布设方式	累计产沙量/g	产沙强度/(g·L <sup>-1</sup> )
DSH	7888.95	8.81
DST	3501.38	4.36
USH	83905.74	100.18
UST	76804.68	92.25

2.2.2 产沙率 由图 5 可知,坡上布设方式的产沙率随时间呈现先上升后下降的变化趋势,坡下片状布设方式的产沙率在前 35 min 变化平稳,之后略有起伏,呈波动变化,坡下条状布设方式的产沙率整体变化平稳。

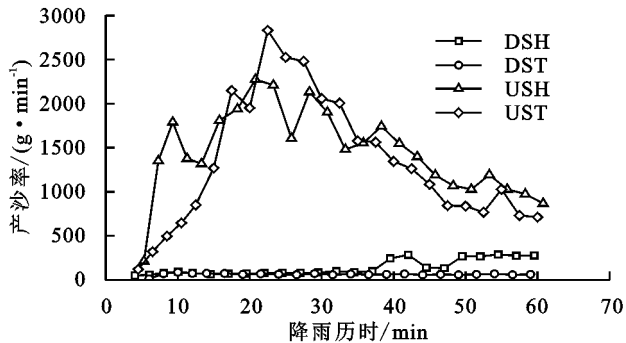


图 5 不同布设方式产沙率随降雨历时变化

2.2.3 产沙量 由图 6 可知,在 0,20 min 时间段坡下 2 种布设方式的累计产沙量远少于坡上布设方式,这是由于径流从坡上向坡下流动过程中,由重力势能转化为的动能有很大一部分受草带的阻拦而消耗,径流搬运泥沙能力减弱,导致径流中的泥沙在经过坡下草带的时候过滤、沉积下来,降低了产沙量。在 20,40 min 时间段坡上布设方式产沙量增长明显,USH 布设方式同比上一时间段产沙量增长了 30.49%,UST 布设方式增长了 124.3%,这是因为这一时间段坡面细沟侵蚀发育较快,随降雨时间增长,径流对坡面细沟的冲刷也逐渐加大,导致坡上布设方式的产沙量增长较快,而坡下布设方式的产沙量增长缓慢,累计产沙量远少于坡上布设方式,原因同上。在 40,60 min 时间段 DST 布设方式下的产沙量远远少于其他 3 种布设方式,分别占 DSH、DST、UST 布设方式的 44.38%,4.17%,4.56%,原因是坡下条状的布设方式使得含有泥沙的径流在流经坡下条状草地过滤带的时候被其层层拦截,径流流速减慢且难以在短时间内增加,加上坡下无大面积裸地,难以形成较宽、较长的侵蚀沟,从而极大地限制了坡面细沟侵蚀,使得产生泥沙最少;在这一时间段细沟发育逐渐趋于稳定,细沟侵蚀减弱,使得 USH、UST 布设方式在 40~60 min 时间段的累计产沙量比 20,40 min 分别下降了 38.31%,55.67%。

2.2.4 坡面形态 由表 4 可知,从细沟出现时间来

看,DST 布设方式是其他 3 种布设方式的 1.1~1.3 倍,说明其可以有效延缓侵蚀沟产生。这是由于条状布设方式使得坡面没有大面积裸露区域,径流难以汇聚,产生的细沟也难以汇集相连,而在坡下片状布设方式下,坡面其他区域大面积裸露,雨滴溅蚀和坡面小股水流的冲蚀使得坡面较快出现细沟。

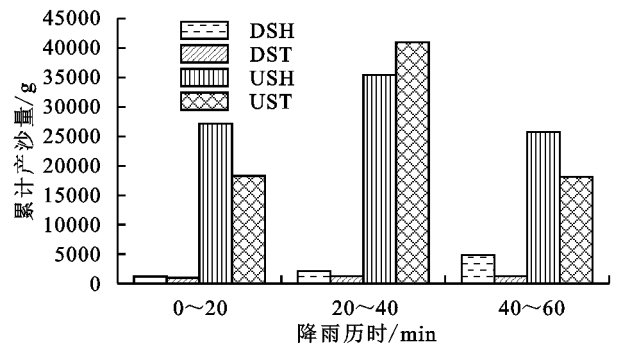


图 6 不同时间段内不同布设方式累计产沙量

在坡上的 2 种布设方式下所产生的最大侵蚀沟长度最终都达到 5 m,比坡下布设方式产生的侵蚀沟长 1.5~3.3 倍,且在坡下条状布设方式下坡面很难产生较长的侵蚀沟,其侵蚀沟数量也最少,这是由于在降雨引发的坡面侵蚀过程中,侵蚀沟多出现在坡面的中下部<sup>[19]</sup>,而坡下条状的布设方式使得坡下没有大面积的连续裸露区域,生成的细沟难以相连,且坡下条状的布设方式使得坡面径流流经草地过滤带的时候流速减缓,冲刷能力下降,而当草地过滤带布设在坡面上部的时候,坡下大面积裸露,不仅受到雨滴溅蚀,还会受到上方汇集而来的径流冲蚀,导致侵蚀沟发育较快,随时间增长,沟头前进,沟底下切,直至发育定型。

表 4 不同布设方式对侵蚀沟发育的影响

布设方式	细沟出现时间/min	最大沟长/cm	沟长>1 m 的细沟数量/条
DSH	13.47	340	4
DST	18.10	150	1
USH	14.56	500	5
UST	16.48	500	3

### 3 结论

(1) 草地过滤带布设在坡下时的水土保持效益要优于坡上布设,坡上布设方式下的产沙量是坡下布设方式的 10~23 倍,产沙率是坡下布设方式的 3~35 倍,当草地过滤带布设在坡下时对泥沙的削减效益最优。

(2) 4 种布设方式中坡下条状布设可以更好地起到调控侵蚀的效果,坡下条状布设方式相比其他 3 种布设方式,初始产流时间延缓了 1.3~1.6 倍,累计产流量比其他 3 种布设方式减少了 3.7%~11.57%,其

他 3 种布设方式的累计产沙量是坡下条状布设方式的 2~24 倍。

(3) 坡下布设方式在抑制细沟侵蚀发育上优于坡上布设方式, 坡下条状布设方式可以有效控制产生细沟的数量以及沟长, 护坡效益最优。

#### 参考文献:

- [1] 李海燕. 土壤侵蚀危害及其防治措施研究现状[J]. 宁夏农林科技, 2011, 52(1): 71-72.
- [2] 孙路遥. 植被护坡技术及其应用研究[J]. 路基工程, 2012(4): 189-191.
- [3] 吴迪. 不同植被措施下坡耕地产沙规律研究[J]. 水利技术监督, 2018, 24(3): 112-114, 133.
- [4] 赵清贺, 冀晓玉, 徐珊珊, 等. 河岸植被对坡面径流侵蚀产沙的阻控效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 170-178.
- [5] 马璠. 作物植被对坡耕地土壤侵蚀的影响研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [6] 甘卓亭, 叶佳, 周旗, 等. 模拟降雨下草地植被调控坡面土壤侵蚀过程[J]. 生态学报, 2010, 28(9): 155-164.
- [7] 高军, 尤迎华, 谈晓珊, 等. 植被过滤带阻控径流污染的机制及研究进展[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(9): 91-97.
- [8] Zhang X C, Shao M A, Huang Z B, et al. An experimental research on soil erosion and nitrogen loss under different vegetation cover [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(6): 1038-1044.
- [9] 李勉, 姚文艺, 陈江南, 等. 草被覆盖对坡面流流速影响的人工模拟试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(12): 43-47.

(上接第 75 页)

- [14] Williams P W. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: A review[J]. *International Journal of Speleology*, 2008, 37(1): 1-10.
- [15] 杨宇琼, 戴全厚, 李昌兰, 等. 模拟降雨条件下喀斯特坡耕地氮磷元素地下漏失特征[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(3): 59-67.
- [16] 高建平, 吴桂武, 黄震, 等. 浅析黔东南地区岩溶地下水化学特征[J]. 地下水, 2015, 37(6): 22-24.
- [17] Dai Q H, Liu Z, Shao H, et al. Karst bare slope soil erosion and soil quality: A simulation case study[J]. *Solid Earth*, 2015, 6(3): 985-995.
- [18] 唐益群, 张晓晖, 周洁, 等. 喀斯特石漠化地区土壤地下漏失的机理研究[J]. 中国岩溶, 2010, 29(2): 121-127.
- [19] 孙钰霞, 李林立, 魏世强. 喀斯特槽谷区表层喀斯特水化学的暴雨动态特征[J]. 山地学报, 2012, 30(5): 513-520.
- [20] 王恒松, 熊康宁, 张芳美. 地形因子对喀斯特坡面水土

- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Ding W, Li M. Effects of grass coverage and distribution patterns on erosion and overland flow hydraulic characteristics[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(6): 1-14.
- [13] 林佳, 宋戈, 张莹. 耕地植被人为干扰格局动态变化特征及其尺度效应[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 275-284.
- [14] 张霞, 李鹏, 李占斌, 等. 不同植被格局下凸型坡径流流速时空变化及产沙研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 16-21.
- [15] 赵清贺, 冀晓玉, 徐珊珊, 等. 河岸植被对坡面径流侵蚀产沙的阻控效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 170-178.
- [16] 朱高立, 黄炎和, 林金石, 等. 不同覆盖度和雨强条件下崩积体坡面侵蚀的动力学特征[J]. 水土保持学报, 2016, 40(2): 1-7.
- [17] 孙丽丽, 查轩, 黄少燕, 等. 不同降雨强度对紫色土坡面侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 21-26.
- [18] 陈佩岩, 马岚, 薛孟君, 等. 华北土石山区不同粒径土壤团聚体特征及其与坡面侵蚀定量关系[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(8): 64-71.
- [19] 王小燕, 王天巍, 蔡崇法, 等. 含碎石紫色土坡面降雨入渗和产流产沙过程[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 189-195.

- 流失影响的机理研究[J]. 水土保持通报, 2015, 35(4): 1-7.
- [21] 严友进, 戴全厚, 伏文兵, 等. 喀斯特坡地裸露心土层产流产沙模拟研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 545-557.
- [22] 彭旭东, 戴全厚, 杨智. 喀斯特山地石漠化过程中地表地下侵蚀产沙特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1237-1248.
- [23] 袁应飞, 戴全厚, 李昌兰, 等. 喀斯特典型坡耕地模拟降雨条件下的土壤侵蚀响应[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 24-28.
- [24] 李昌兰, 戴全厚, 彭旭东, 等. 喀斯特裸坡地地下孔(裂隙)流养分流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 19-23, 114.
- [25] Zhang X B, Bai X Y, He X B. Soil creeping in the weathering crust of carbonate rocks and underground soil losses in the karst mountain areas of southwest China[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2011, 26(2): 149-153.