

黄土高原坡耕地土壤物理结皮对坡面产流产沙过程的影响

马金龙¹, 许欢欢¹, 王 兵^{1,2}, 张宝琦³, 淡彩虹¹

(1.西北农林科技大学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; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.黄河水土保持西峰治理监督局, 甘肃 庆阳 745000)

摘要: 探究黄土高原坡耕地土壤物理结皮对坡面产流产沙的影响和作用机理, 为黄土高原坡耕地水土流失防治提供科学依据。通过室内人工模拟降雨试验, 研究坡耕地沉积结皮和翻耕以后形成的击溅结皮对坡面产流产沙过程的影响。根据研究区坡耕地结皮形成的特点, 试验共设计 5 个处理, 分别为裸地、沉积结皮、沉积结皮破坏、翻耕和翻耕击溅结皮, 每个处理对应 2 个重复, 以安塞黄绵土 25°坡面为例, 设置雨强为 120 mm/h, 降雨历时为 1 h。结果表明: (1) 坡耕地沉积结皮促进坡面产流、抑制坡面产沙, 打破结皮后, 总产沙量是原来的 19.28 倍。 (2) 经过翻耕的坡耕地, 总产流量较原来减少了 19.91%, 但总产沙量增加了 14.67%; 此外, 翻耕地形成击溅结皮以后, 总产流产沙量分别是原来的 4.08、9.98 倍。 (3) 累计泥沙量随累计径流量的增加呈幂函数增加, 根据坡耕地表土结皮的覆盖情况, 可将增加过程分为凸增(结皮覆盖)和凹增(无结皮覆盖)。综上所述, 坡耕地下田埂或草带处, 泥沙沉积脱干而形成的沉积结皮, 应积极保护; 经过翻耕的坡耕地, 由降雨所致而形成的击溅结皮, 应及时打破。

关键词: 土壤侵蚀; 物理结皮; 产流产沙; 累计径流量; 累计泥沙量

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)01-0045-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.01.007

Effect of Soil Physical Crust on Runoff and Sediment Yield on Sloping Farmland of the Loess Plateau

MA Jinlong¹, XU Huanhuan¹, WANG Bing^{1,2}, ZHANG Baoqi³, DAN Caihong¹

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3.Supervision Bureau of Soil and Water Conservotioin, Xifeng Governace, Qingyang, Gansu 745000)

Abstract: To explore the effect and mechanism of soil physical crust on runoff and sediment yield on the Loess Plateau sloping farmland, so as to provide scientific basis for the prevention and control of soil and water loss on sloping farmland in the Loess Plateau, indoor artificial rainfall simulation experiment was conducted to study the influence of deposition crust on slope farmland and splashing crust formed after ploughing on the production process of runoff and sediment on slope. According to the crust formation characteristics of sloping farmland in the study area, five treatments were designed in the experiment, including bare land, deposition crust, deposition crust destruction, tillage and tillage splashing crust, and each treatment corresponded to two replicates. Taking the 25° slope of Ansai loessial soil as an example, the rainfall intensity was set to 120 mm/h and the rainfall duration was set to 1 h. The results showed that: (1) The deposition crust of sloping farmland promoted slope runoff and inhibited slope sediment yield. After breaking the crust, the total sediment yield was 19.28 times that of the original. (2) After ploughing, the total runoff decreased by 19.91%, but the total sediment yield increased by 14.67%. In addition, after ploughing the cultivated land and forming splashing crust, the total sediment yield was 4.08 times and 9.98 times that of the original, respectively. (3) The cumulative sediment amount increased as power function with the increasing of cumulative runoff. According to the coverage of topsoil crust on sloping farmland, the increase process could be di-

vided into convex increase (crust coverage) and concave increase (no crust coverage). In summary, the deposition crust formed by sediment deposition drying at the ridge or grass belt under sloping farmland should be actively protected. The splashing crust formed by rainfall in the ploughed sloping land should be broken in time.

Keywords: soil erosion; physical crust; runoff and sediment yield; cumulative runoff; cumulative sediment

坡耕地是黄土高原地区主要的土地利用类型,也是黄土高原土壤侵蚀最严重的区域^[1]。坡耕地土质疏松,有机质含量较低,粉砂含量较高,在降雨冲击和径流冲刷下,土壤表面极易形成物理结皮^[2]。土壤物理结皮是指在雨滴击溅和土壤颗粒理化分散作用下,土壤表面孔隙被堵塞或挟沙水流程经土表时细小颗粒沉积而形成的一层很薄的土表硬壳^[3]。按其形成机制可分为击溅结皮和沉积结皮;击溅结皮是土壤结构表面受雨滴打击,使土壤颗粒重组形成的物理结皮;沉积结皮是通过静止或缓慢流动水中的颗粒沉积而形成的物理结皮^[4]。土壤物理结皮可显著影响土壤侵蚀过程。一方面,土壤物理结皮会阻止水分入渗,降低渗透率,增加地表径流,从而导致坡面土壤侵蚀量增加^[5-8];另一方面,土壤物理结皮的发育提高了表土的切变强度,可以避免土壤分离,抑制坡面产沙。目前,有关土壤物理结皮的形成过程、机理和主要影响因素等问题,前人^[9]已做了较为系统深入的研究。但仍有不足,一是经过翻耕的坡耕地,由降雨所致而形成的击溅结皮对坡面产流产沙过程的影响;二是坡耕地下田埂或草带处,由泥沙沉积脱干而形成的沉积结皮以及结皮破坏后对坡面产流产沙过程的影响。基于此,本文通过室内人工模拟降雨的方法,探究坡耕地沉积结皮和翻耕以后形成的击溅结皮对坡面产流产沙过程的影响,以期为黄土高原坡耕地水土流失防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2020 年 7—8 月在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室降雨大厅进行。人工模拟降雨采用 QYJY-503 固定式人工降雨设备,该设备采用组合喷头降雨,喷头安置高度均为 18 m,可调节雨强范围为 30~300 mm/h,降雨均匀度>80%,雨滴终点速度近似天然降雨。供试土壤为黄绵土,取自延安市安塞区坡耕地表层(0—20 cm),土壤黏粒、粉粒

和砂粒质量分数分别为 15.74%,63.45%,20.81%,质地为粉质黏壤土。试验所用土槽的长×宽×高分别为 2.0 m×0.5 m×0.5 m。

1.2 试验方法

试验共设置 5 个处理:裸地对照(T₀)、沉积结皮(T₁)、沉积结皮破坏(T₂)、翻耕(T₃)、翻耕击溅结皮(T₄),每个处理重复 2 次。其中,T₀处理主要进行定容填土;T₁处理是在 T₀处理基础上,通过雨水浸泡土壤,以模拟坡耕地下田埂或草带处,泥沙沉积后脱干形成的沉积结皮;T₂处理是在 T₁处理基础上,打破沉积结皮,去除结皮时,用铁铲小心地从结皮层与下伏土壤分界处铲掉结皮,用刷子刷掉虚土,将对地表造成的扰动降到最低;T₃处理是在 T₀处理基础上,通过使用钉耙将表层土壤打散、疏通,根据陕北当地正常翻耕情况^[10],设置翻耕深度为 20 cm;T₄处理是在 T₃处理基础上,进行降雨雨滴打击形成击溅结皮(表 1)。所有处理采取对应措施后,距离人工模拟降雨时间间隔均为 1 个月;期间,未受到外界因素干扰。

将供试土壤过 2 mm 孔筛以去除草根和砾石,并事先在土槽底部铺 10 cm 细沙,保证土壤水分均匀下渗,同时铺 1 层纱布隔开土和沙,然后对土槽进行填土。填土时将土壤容重控制在 1.2 g/cm³左右,每层填土厚 10 cm,铺平、压实,每次填土之前将下层土壤打毛,以消除土壤分层现象,填土总厚度为 40 cm。共布设 10 个土槽,土槽坡度均为 25°。降雨强度设置为 120 mm/h,以模拟黄土高原地区的极端降雨情况^[11],降雨历时为 1 h。试验开始前率定雨强,控制雨强误差在 5%以内;同时,对所有土槽缓慢喷水雾至饱和,以消除前期土壤含水量对试验的影响。降雨开始后每 2 min 收集 1 次径流泥沙样,并称重。静置澄清,待泥沙完全沉淀后倒掉上层液,将剩余泥沙样移至铁盒内,置于烘箱中在 105 ℃条件下烘干 24 h 后测定泥沙质量,并计算径流量。

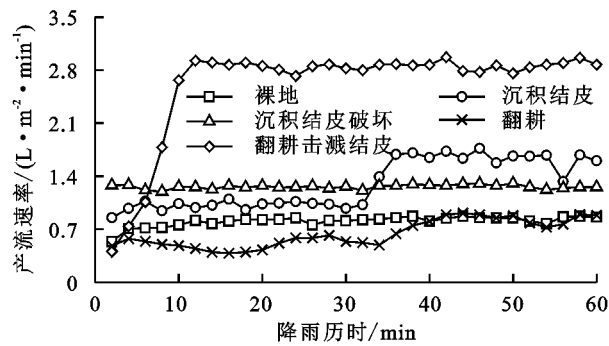
表 1 试验处理过程

代码	处理名称	处理描述	处理效果
T ₀	裸地对照	定容填土	通用试验对照处理
T ₁	沉积结皮	雨水浸泡、泥沙沉积后脱干形成沉积结皮	沉积结皮对土壤侵蚀过程的影响
T ₂	沉积结皮破坏	在 T ₁ 处理基础上,打破沉积结皮	沉积结皮失效后土壤侵蚀过程变化
T ₃	翻耕	将表层(0—20 cm)土壤打散、疏通	坡耕地翻耕对土壤侵蚀过程的影响
T ₄	翻耕击溅结皮	在 T ₃ 处理基础上,进行降雨雨滴打击形成击溅结皮	击溅结皮对土壤侵蚀过程的影响

2 结果与分析

2.1 土壤物理结皮对坡面产流过程的影响

土壤物理结皮可显著影响坡面产流过程(图 1)。物理结皮覆盖情况下,降雨后期产流速率均趋于稳定,且都高于前期;沉积结皮产流速率的增长主要集中于 30~35 min,击溅结皮则在前 10 min 出现了相



注:图柱上不同字母表示不同处理间差异极显著($p<0.01$)。下同。

图 1 不同处理下的产流过程和总产流量

2.2 土壤物理结皮对坡面产沙过程的影响

土壤物理结皮可显著影响坡面产沙过程(图 2)。翻耕击溅结皮覆盖坡面产沙速率总体高于其他处理,且前 16 min 持续增加,随后降低并趋于稳定。总体而言,沉积结皮覆盖抑制坡面产沙,但经过翻耕而形成的击溅结皮促进坡面产沙;沉积结皮总产沙量较裸地减少了 94.48%,翻耕击溅结皮总产沙量是翻耕的 9.98 倍;打破沉积结皮总产沙量是沉积结皮的 19.28 倍。此外,翻耕措施促进坡面产沙,其总产沙量较裸

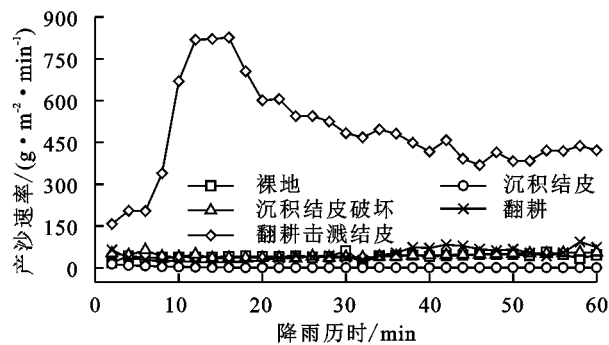


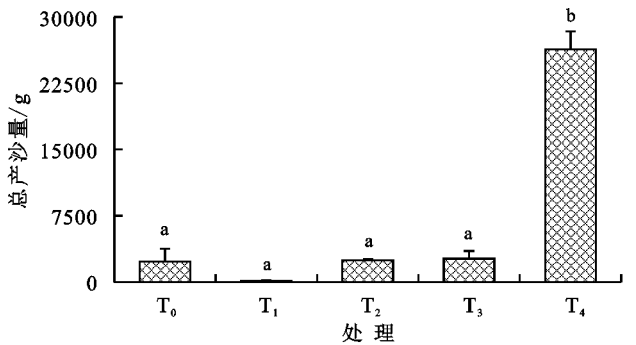
图 2 不同处理下的产沙过程和总产沙量

2.3 累计径流量与累计泥沙量的关系

基于以上研究,进一步分析累计径流量与累计泥沙量的变化规律及相关关系。在降雨过程中,水沙是系统间水流能量传递的媒介,不仅影响系统入渗、产流能力,也会影响到系统径流挟沙能力和侵蚀产沙量^[12]。由图 3 可知,累计径流量和累计泥沙量均随降雨历时逐渐增加,但增长的速率和幅度有所差别。其中,径流量增长幅度大小关系为翻耕击溅结皮>沉积结皮>沉积结皮破坏>裸地>翻耕,泥沙量增长幅度大小关系为翻耕击溅结皮>翻耕>沉积结皮破

对迅速的增加;其他处理产流速率总体随时间变化相对稳定。总体而言,土壤物理结皮覆盖促进坡面产流;沉积结皮总产流量较裸地增加了 62.74%,翻耕击溅结皮总产流量是翻耕的 4.08 倍;打破沉积结皮后,总产流量减少了 2.78%。此外,翻耕措施可抑制坡面产流,其总产流量较裸地减少了 19.91%。

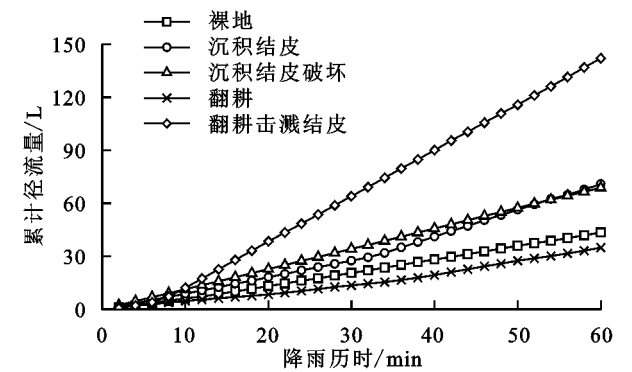
地增加了 14.67%。为进一步说明径流在坡面侵蚀产沙过程中作用的大小,分别计算裸地、沉积结皮、沉积结皮破坏、翻耕和翻耕击溅结皮处理的泥沙浓度,依次为 52.89, 1.79, 35.57, 75.71, 185.36 g/L, 该值越大,说明在径流量相等的情况下,产生的泥沙越多,表明该处理下土壤的抗侵蚀能力较弱,故不同处理下土壤抗侵蚀能力的大小关系为沉积结皮>沉积结皮破坏>裸地>翻耕>翻耕击溅结皮。



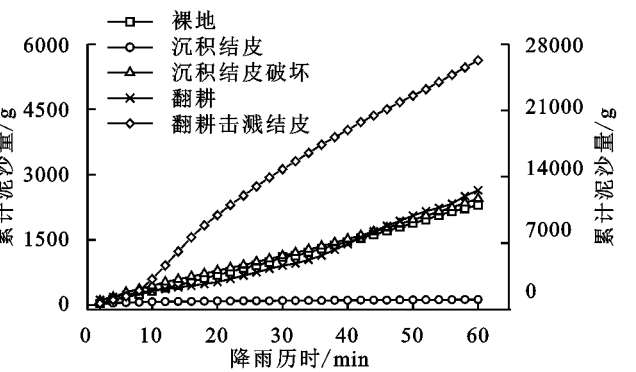
坏>裸地>沉积结皮;故而,击溅结皮、沉积结皮破坏和裸地径流量与泥沙量的增长幅度保持同步。

本研究对不同处理下的累计径流量与累计泥沙量进行函数拟合,发现二者均满足幂函数的形式($y=Ax^B$, y 为累计泥沙量, x 为累计径流量),相关系数均在 97% 以上。图 4 分别对应不同处理下累计径流量与累计泥沙量的函数关系。由函数关系 $y=Ax^B$ 可知,随累计径流量的逐渐增加,累计泥沙量也逐渐增大。结合数学概念与实际径流产沙的物理意义^[12-14],定义 A 为产沙基数系数, A 值越大则产沙越多, A 值取决于植被

类型以及相应的人工措施,本研究只考虑人工措施。定义 B 为产沙速率系数,物理结皮覆盖条件下, $0 < B < 1$; 无物理结皮覆盖条件下, $B > 1$ 。当 $0 < B < 1$ 时,单



位体积累计径流量所产生的泥沙量逐渐减少(曲线凸增),当 $B > 1$ 时,单位体积累计径流量所产生的泥沙量逐渐增多(曲线凹增)。



注:翻耕击溅结皮累计泥沙量对应右轴。下同。

图 3 不同处理下累计径流量、泥沙量变化情况

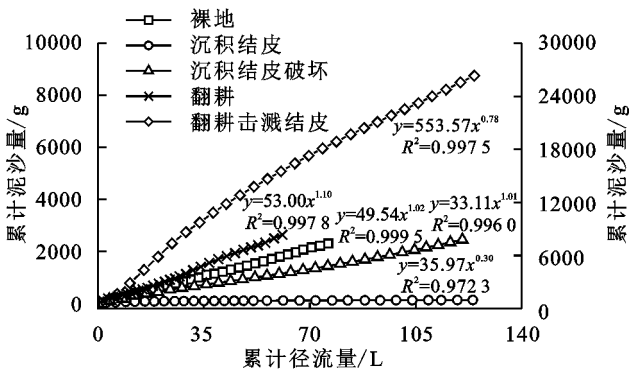


图 4 累计径流量与累计泥沙量的函数关系

3 讨论

3.1 土壤物理结皮对坡面产流产沙过程的影响

土壤物理结皮显著影响土壤理化性质,并对径流入渗、土壤侵蚀等过程产生重要影响^[2]。本研究结果表明,物理结皮覆盖情况下,降雨后期产流速率均高于前期,主要有 2 个方面原因:一方面黄土区土壤水分入渗类型为超渗产流,土壤水分入渗速率随降雨逐渐减小,当降雨强度大于土壤水分入渗速率时,雨滴降落至坡面不能及时入渗,变为坡面径流^[15-17];另一方面,降雨初期坡面径流要经过蓄积、汇流形成水流通路,使产流速率逐渐增加^[18]。另外,翻耕击溅结皮覆盖坡面产沙速率总体高于其他处理,且前 16 min 持续增加,这是因为翻耕击溅结皮总产流量显著高于其他处理,且在降雨前 10 min,产流速率迅速增加,为坡面泥沙的产生提供了先决条件。

土壤物理结皮以 2 种矛盾的方式影响土壤侵蚀,一方面表土结皮的致密结构有助于增强土壤表面强度^[19],从而提高土壤的抗蚀力;另一方面,表土结皮的致密结构降低土壤入渗^[20],致使产流量增加,水流侵蚀力提高^[21]。抗蚀力和侵蚀力的相对贡献决定着土壤侵蚀的发生发展及侵蚀形态的转变。本研究结

果显示,沉积结皮总产流量较裸地有所增加,但总产沙量减少,打破结皮后,总产流量略微减少,总产沙量增加近 20 倍;由此表明,本试验条件下,沉积结皮表面抗蚀力大于水流侵蚀力。此外,坡耕地经过翻耕以后,总产流量有所减少,而总产沙量增加,这是由于翻耕土壤结构疏松,孔隙度增加,进而推动了径流下渗的发生,也为泥沙的产生提供了基础^[22]。对于坡耕地而言,翻耕不仅加剧土壤侵蚀的发生,而且翻耕以后土壤更容易形成物理结皮,尤其在雨水季节。本研究条件下,翻耕击溅结皮总产流产沙量分别是翻耕的 4.08、9.98 倍;故而,翻耕击溅结皮表面抗蚀力小于水流侵蚀力。

3.2 累计径流量与累计泥沙量的关系

坡面累计径流量与累计泥沙量之间的相互关系可以定量反映坡面侵蚀过程中产流与产沙之间的动态变化规律。本研究结果表明,有物理结皮覆盖时,产沙速率系数均介于 0~1,于国强等^[14]研究得出,不同植被类型条件下累计径流量与累计泥沙量回归拟合得到的产沙速率系数均介于 0~1;无物理结皮覆盖时,产沙速率系数均 > 1 ,李洪丽等^[13]研究得出,不同雨强条件下累计径流量与累计泥沙量回归拟合得到的产沙速率系数均 > 1 。综上,当坡面有植被或结皮覆盖时,产沙速率系数将介于 0~1;当坡面无植被和结皮时,该系数将 > 1 。结合数学概念和实际径流产沙的物理意义,当产沙速率系数介于 0~1 时,假设把 x 轴对应的参数(累计径流量)取极限,那么函数曲线最终将平行于 x 轴;换言之,如果累计径流量取无穷大,累计泥沙量最终将达到一个恒定值;这是因为土壤结皮的形成是一个随着降雨历时延长而逐渐完善的过程,长时间的降雨历时会造成土壤团聚体被破坏分散的程度更加强烈,进而填充表层土壤孔隙的

细颗粒土壤也越多,使土壤结皮的发育逐渐完善,最终土壤结皮抑制产沙,该状态仅指在相同的降雨强度条件下。

4 结 论

(1)坡耕地沉积结皮促进坡面产流、抑制坡面产沙。打破结皮后,产流的抑制效果不明显,产沙作用增强。

(2)坡耕地经过翻耕可抑制坡面产流,但产沙作用增强。此外,翻耕地形成击溅结皮以后,总产流产沙量分别是原来的 4.08,9.98 倍。

(3)累计泥沙量随累计径流量的增加呈幂函数增加,有物理结皮覆盖时,函数曲线凸增,无物理结皮覆盖时,函数曲线凹增。可见,坡耕地土表概况显著影响幂函数曲线的走势。

综上,坡耕地地下田埂或草带处,泥沙沉积脱干而形成的沉积结皮,应积极保护;经过翻耕的坡耕地,由降雨所致而形成的击溅结皮,应及时打破;此外,坡耕地应采取免耕、少耕措施,以利于维护土壤结构,降低水土流失。

参考文献:

[1] 杨萌,宋晓鹏,张岩,等.黄土高原丘陵区典型流域坡耕地分布及其侵蚀地形特征[J].中国水土保持科学,2020,18(6):1-8.

[2] 孙贞婷,胡霞,李宗超,等.土壤理化性质与土壤溅蚀速率的相关性研究[J].水土保持研究,2017,24(3):53-58.

[3] 卜崇峰,蔡强国,张兴昌,等.土壤结皮的发育特征及其生态功能研究述评[J].地理科学进展,2008,27(2):26-31.

[4] 乔宇,徐先英.干旱荒漠区物理结皮的土壤水文效应[J].中国农学通报,2015,31(7):206-211.

[5] 程琴娟,蔡强国,李家永.表土结皮发育过程及其侵蚀响应研究进展[J].地理科学进展,2005,24(4):114-122.

[6] 程琴娟,蔡强国,廖义善.土壤表面特性与坡度对产流产沙的影响[J].水土保持学报,2007,21(2):9-11,15.

[7] 吴发启,范文波.土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响[J].中国水土保持科学,2005,3(2):97-101.

[8] Levy G J, Levin J, Shainberg I. Seal formation and interrill soil-erosion[J]. Soil Science Society of America

Journal,1994,58(1):203-209.

[9] Moore D C, Singer M J. Crust formation effects on soil erosion processes[J]. Soil Science Society of America Journal,1990,54(4):1117-1123.

[10] 李裕元,邵明安.土壤翻耕对坡地水分转化与产流产沙特征的影响[J].农业工程学报,2003,19(1):46-50.

[11] 李兆松,王兵,汪建芳,等.铁杆蒿与白羊草枯落物覆盖量对黄土坡面流水动力特性的影响[J].农业工程学报,2018,34(17):151-157.

[12] 朱智勇,解建仓,李占斌,等.坡面径流侵蚀产沙机理试验研究[J].水土保持学报,2011,25(5):1-7.

[13] 李洪丽,韩兴,张志丹,等.东北黑土区野外模拟降雨条件下产流产沙研究[J].水土保持学报,2013,27(4):49-52,57.

[14] 于国强,李占斌,李鹏,等.不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J].水科学进展,2010,21(5):593-599.

[15] 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.

[16] 吴秋菊,吴佳,王林华,等.黄土区坡耕地土壤结皮对入渗的影响[J].土壤学报,2015,52(2):303-311.

[17] Wu S F, Wu P T, Heng F. Effects of alfalfa coverage on runoff,erosion and hydraulic characteristics of overland flow on loess slope plots[J].Frontiers of Environmental Science and Engineering in China,2011,5(1):76-83.

[18] 徐铭泽,杨洁,刘窑军,等.不同母质红壤坡面产流产沙特征比较[J].水土保持学报,2018,32(2):34-39.

[19] 程琴娟,蔡强国.模拟降雨下黄土表土结皮的侵蚀响应[J].水土保持学报,2013,27(4):73-77.

[20] Tackett J L, Pearson R W. Some characteristics of soil crusts formed by simulated rainfall[J]. Soil Science, 1965,99(6):407-413.

[21] 唐泽军,雷廷武,张晴雯,等.雨滴溅蚀和结皮效应对土壤侵蚀影响的试验研究[J].土壤学报,2004,41(4):632-635.

[22] 裴峥,段喜明.翻耕和覆盖对坡耕地产流产沙的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2016,36(6):412-416.