

黄土坡面下坡位片蚀过程试验研究

刘俊娥¹, 王占礼^{2,3}, 高素娟¹, 张宽地⁴, 陈浩¹, 王莎¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学
水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 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; 4. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 坡面片蚀强度具有沿程空间变化性, 阐明坡面不同坡位的片蚀过程对于完善坡面土壤侵蚀理论具有重要意义。采用组合小区模拟降雨试验方法对黄土坡面下坡位片蚀过程进行了研究, 结果表明: (1) 坡面下坡位片蚀特征与坡面上坡位及全坡面片蚀特征存在差异, 下坡位片蚀规律性较差; (2) 坡面下坡位片蚀随降雨过程、雨强和坡度的变化均呈现波动性, 总体上随降雨过程先增大后稳定, 随雨强及坡度的增大而增大; (3) 坡面下坡位片蚀随雨强和坡度的变化可用二元线性方程描述, 雨强的影响远大于坡度; (4) 坡面上坡位汇流和下坡位产流及上坡位输沙对下坡位片蚀的影响可用二元线性方程描述, 其中前者贡献率为 56.9%, 后者贡献率为 25.4%, 水的作用显著大于沙的作用。采取增加坡面入渗、减少径流的水保措施可有效防治坡面下坡位片蚀。

关键词: 黄土坡面; 下坡位; 片蚀

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)05-0023-05

中图分类号: S157.1

Experimental Study on Sheet Erosion Process on Down Slope Segment of Loess Hillslopes

LIU Jun-e¹, WANG Zhan-li^{2,3}, GAO Su-juan¹, ZHANG Kuan-di⁴, CHEN Hao¹, WANG Sha¹

(1. School of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;

4. School of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: As sheet erosion has spatial variations along slope, it is important for the improvement of soil erosion theory to explain soil erosion process on different segments of a hillslope. Sheet erosion characteristics on downslope were analyzed based on experiments of simulated rainfall with multiple plots. The results show that the sheet erosion characteristics on the down slopes differed from those on the whole slopes and upslopes. The sheet erosion on downslopes displayed extremely strong variability. The sheet erosion rates fluctuated with rainfall course, rainfall intensity, and slope gradient. Generally, it increased with the increased time at beginning and then stabilized. The rate increased with slope gradient and rainfall intensity. The variation of sheet erosion modulus with rainfall intensity and slope gradient can be described by a duality linear equation and rainfall intensity affected sheet erosion modulus much greater than slope gradient. The impact of runoff from both upslope and downslope and sediment from upslope on downslope sheet erosion were described by a duality linear equation, with contributions of 56.9% and 25.4%, respectively. Runoff had a greater effect than sediment. It can effectively control sheet erosion on downslope to take measures such as increasing the infiltration and reducing runoff.

Keywords: loess hillslope; downslope segment; sheet erosion

收稿日期: 2011-04-17

修回日期: 2011-05-24

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土坡面细沟侵蚀动力学过程组合小区试验研究”(40971172); 国家 973 计划课题“不同类型区土壤侵蚀过程与机理”(2007CB407201); 中国科学院知识创新工程重要方向项目“多沙粗沙区土壤水蚀机理研究”(KZCX2-YW-442-04); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室专项经费资助项目“坡面流及其输沙侵蚀动力学特征”(10502-Z12-7)

作者简介: 刘俊娥(1987—), 女(汉族), 山西省河曲县人, 博士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: liujune20041021@yahoo.com.cn.

通信作者: 王占礼(1960—), 男(汉族), 陕西省佳县人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程及预报模型研究。E-mail: zwang@nwsuaf.edu.cn.

黄土高原地貌特征特殊,不同部位的入渗和水沙运移方式不同,坡面侵蚀存在明显的垂直分异规律^[1-3]。由于坡面水沙汇集过程的存在,侵蚀在坡面上的空间变化主要表现为其在不同坡长部位的沿程变化。肖培青等^[4]和郑粉莉等^[5]研究发现,上方来水来沙通过上方来水量和含沙量的变化影响着下坡位侵蚀产沙。陈浩^[6-7]通过试验发现,上方来水量和降雨特征影响下坡位的侵蚀特征。在侵蚀过程中,上坡来水来沙是上下坡位之间能量的传递介质,其含水量和含沙量会直接影响到下坡位的侵蚀特征^[8-11],下坡位侵蚀受到上坡位汇流及输沙、下坡位自身产流等的综合影响,必然会具有与上坡位不同的侵蚀特征。以往的研究主要揭示的是从坡顶开始不同坡长的总侵蚀,并没有揭示坡面下坡位的侵蚀特征。本文采用组合小区模拟降雨试验方法对相同条件下不同坡位的坡面片蚀过程进行观测,分析阐明黄土坡面下坡位片蚀过程特征及其对上坡位汇流输沙的响应,以进一步完善坡面侵蚀理论,并为黄土坡面水土流失治理提供科学依据。

1 材料与方 法

本研究采用室内模拟降雨试验方法进行,试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅进行,试验土壤取自位于黄河中游多沙粗沙区内的陕西省神木县,土壤类型为沙黄土。

试验装置为由 2 个小区组成的可调坡度组合小区,1 号小区尺度为 3 m×0.5 m×0.5 m,2 号小区尺度为 1 m×0.5 m×0.5 m,2 号小区与 1 号小区相邻,且上边缘处于同一高度位置。1 号小区的观测结果代表 3 m 坡长小区的片蚀,2 号小区的观测结果代表 3 m 坡长上坡位 1 m 坡长的片蚀。在相同坡度和雨强条件下,2 个小区片蚀观测值相减得出 3 m 坡长小区下坡位(1~3 m)的片蚀,以此来研究黄土坡面

下坡位片蚀过程。试验土壤自然风干并过 5 mm 筛。试验组合小区底部铺设 10 cm 厚的天然细沙,装土厚度 20 cm,装土容重为 1.5 g/cm³。进行试验前一天,对试验小区进行小雨强的前期预降雨,以减少土壤装填的变异性,并以刚开始出现产流来控制降雨时间。试验雨强分别为 1,1.33,1.67,2,2.33 mm/min,试验坡度分别为 9°,12°,15°,18°,21°,采用完全组合,试验共进行 50 场次(重复 1 次),降雨以不出现细沟来控制降雨时间。各次试验中,详细观测产流产沙全过程,产流开始后每 1 min 取浑水样 1 次,接样时间 30 s,取样体积用量筒量取,采用烘干称重法测得取样泥沙重,通过计算获得分析需要的不同侵蚀特征。

2 结果与分析

2.1 黄土坡面下坡位片蚀随降雨过程的变化

图 1 表示在坡度 15°不同雨强条件下,黄土坡面下坡位(1~3 m)、上坡位(0~1 m)、全坡位(0~3 m)片蚀率随降雨过程的变化。从图 1 可以看出,随着降雨过程的持续,全坡位片蚀率和上坡位片蚀率均呈现很好的规律性变化,在产流后 4~5 min 内均迅速增大,然后趋于稳定。与之比较,下坡位片蚀率变化过程的规律性较差,但从总体趋势看,可以发现下坡位片蚀率在产流后 4~5 min 内也呈迅速增大的趋势,随后的变化在某一范围内波动比较大,但依旧呈现总体上趋于稳定的趋势。通过对全坡位、上坡位和下坡位片蚀率的变化规律的比较,可以发现不同部位的片蚀率存在差异。试验中上坡位和全坡位的片蚀率是通过直接观测 2 个小区整体平均片蚀量得到的,而下坡位的片蚀率则是对全坡位和上坡位的观测数据作对应相减计算得出的。下坡位的片蚀率呈现较大波动的变化,可以说明观测分析小区平均片蚀特征的试验方法只能代表整个坡面的平均侵蚀过程,而不能反映坡面不同坡位的实际侵蚀变化过程。

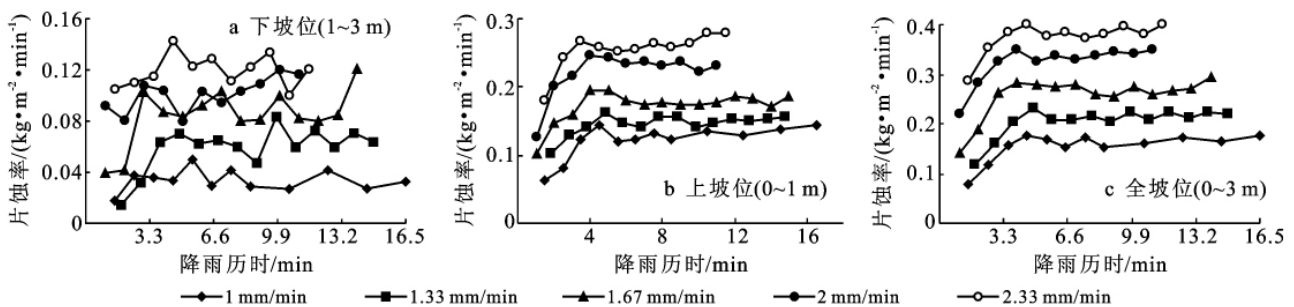


图 1 不同雨强下黄土坡面不同坡位片蚀率随降雨过程的变化

由于下坡位片蚀随降雨过程的变化规律性不明显,直接用瞬时片蚀模数和降雨历时建立关系的相关

性差,因此将瞬时片蚀模数按时段累加,分析累积片蚀模数与降雨历时的关系。对同一坡度不同雨强条件下

黄土坡面下坡位的累积片蚀模数和降雨历时进行统计分析,结果表明,二者存在很好的线性关系(表 1)。

表 1 黄土坡面下坡位(1~3 m)累积片蚀模数随降雨历时变化的经验方程

| 雨强/ (mm·min ⁻¹) | 经验方程 | 相关系数 | 显著性 水平 |
|--------------------------------|----------------------------|---------|-----------|
| 1.00 | $Y_c = 0.034 0D - 0.023 5$ | 0.998 8 | <0.01 |
| 1.33 | $Y_c = 0.063 5D - 0.126 7$ | 0.999 3 | <0.01 |
| 1.67 | $Y_c = 0.088 2D - 0.077 8$ | 0.999 4 | <0.01 |
| 2.00 | $Y_c = 0.101 2D - 0.027 8$ | 0.999 0 | <0.01 |
| 2.33 | $Y_c = 0.122 3D - 0.082 2$ | 0.999 8 | <0.01 |

注: Y_c 为 D 时段的累积片蚀模数(kg/m²); D 为降雨历时(min)。

实际的坡面下坡位片蚀过程中,侵蚀会受到多方面的综合影响,包括自身产流,上坡位汇流,上坡位输沙等,其过程复杂,影响因子多样,出现片蚀率随降雨过程变化不规则的现象。降雨初期的侵蚀是溅蚀过程,雨滴分离搬运作用强,受坡度的影响,雨滴向下坡搬运的土粒多,下坡位片蚀量迅速增大。经过一段时间的降雨后,径流产生,水深变大,水流侵蚀作用增强,下坡位的含沙水流由自身的产流产沙和来自上坡位的汇流与输沙水流混合而成。此时,径流含沙量的变化情况复杂,不一定和径流率的变化相呼应,片蚀率呈现出较大的波动性。同时,随着降雨过程的持续,全坡位片蚀和上坡位片蚀都达到一种稳定状态,因此,表现出来的下坡位片蚀率虽波动较大,但在某一范围内仍呈现一定的稳定趋势。同时,通过图 1a 和图 1b 的对比可以发现,下坡位的片蚀率小于上坡

位的片蚀率,这是由于侵蚀不仅受径流量大小的影响,同时也受水流含沙量大小的影响。对于极易分离的黄土而言,含沙水流的侵蚀大小主要决定于水流输沙能力,饱和含沙量与实际含沙量的差值越大侵蚀越强,清水的侵蚀量最大,随着水流含沙量的增大,侵蚀逐步减弱,若水流含沙达到饱和,则侵蚀为 0。试验中,由于坡面从上到下是降雨产流汇流的过程,下坡位的径流量必然增大,理论上讲其动力作用越强,侵蚀越多。但实际上,由于水流向下流动过程也是侵蚀挟带泥沙的过程,在上坡位顶端,侵蚀水流是清水,侵蚀力最强。随着水流逐渐沿坡面向下流动,水流含沙量越来越大,加之黄土极易侵蚀,含沙量增加快,因此,向下坡流动的水流其含沙量与饱和含沙量之差越来越小,其侵蚀能力越来越下降,这样就出现了下坡位侵蚀比上坡位小的现象。

2.2 雨强对黄土坡面下坡位片蚀的影响

图 2 表示不同坡度条件下,黄土坡面下坡位(1~3 m)、上坡位(0~1 m)、全坡位(0~3 m)片蚀模数随雨强的变化特征。从图 2 可以看出,随着雨强的增大,坡面不同坡位的片蚀模数是增大的,全坡位和上坡位片蚀模数的变化较下坡位片蚀模数呈现更加规律性的增大趋势。下坡位片蚀模数在坡度 12°和 15°的波动性比较大,呈现出在 12°先增大后减小,在 15°先减小后增大的趋势。片蚀模数其它坡度下总体上呈现随坡度增大而增大,雨强大于 2 mm/min 后片蚀模数趋于稳定的趋势。不同坡度下的下坡位片蚀模数皆为正数,说明试验条件下坡面下坡位没有发生沉积。

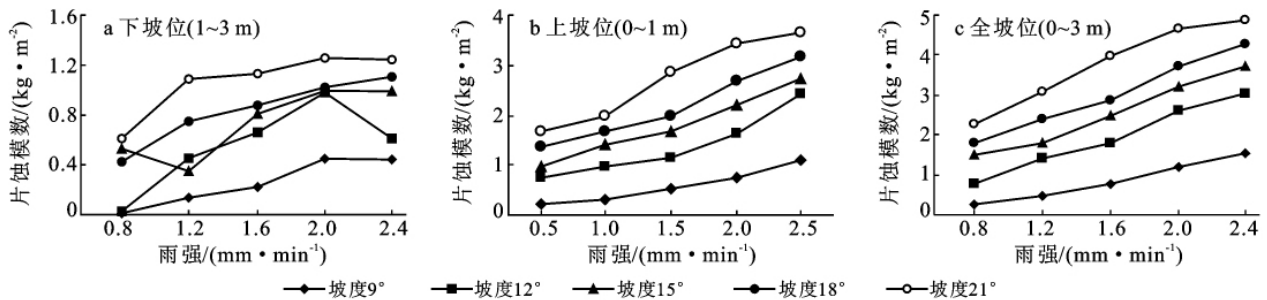


图 2 不同坡度下黄土坡面不同坡位片蚀模数随雨强的变化

对不同坡度条件下黄土坡面下坡位的片蚀模数和雨强的关系进行统计分析,结果表明,二者呈很好的对数关系(表 2)。

雨强对片蚀的影响主要是通过降雨量和雨滴大小实现的。降雨量大,径流量也就大,水流的分离搬运作用也就强。雨滴对土壤表面有打击和对水流有扰动的作用,被雨滴击溅分离的土粒可为水流提供可

搬运的土壤颗粒。雨强大,则降雨动能大,溅蚀作用强,可搬运的土粒就多;水流紊动性增大,水流的侵蚀力就强。同时,溅蚀作用会阻塞土壤空隙,减小入渗量,增大径流量。各种效应相互叠加,故片蚀强度随雨强增大而增大。下坡位片蚀过程呈现出一定幅度的波动现象,主要是因自身的产流和上坡位汇流输沙的综合影响所致。

表 2 黄土坡面下坡位(1~3 m)片蚀模数随雨强变化的经验方程

| 坡度/ (°) | 经验方程 | 相关系数 | 显著性水平 |
|------------|------------------------|--------|-------|
| 9 | $Y=0.5566\ln I-0.0082$ | 0.9690 | <0.01 |
| 12 | $Y=0.8654\ln I+0.1428$ | 0.8312 | 0.08 |
| 15 | $Y=0.7283\ln I+0.3947$ | 0.8473 | 0.07 |
| 18 | $Y=0.7945\ln I+0.4661$ | 0.9896 | 0.32 |
| 21 | $Y=0.7189\ln I+0.7318$ | 0.9084 | 0.03 |

注:Y 为片蚀模数(kg/m²); I 为降雨强度(mm/min)。

2.3 坡度对黄土坡面下坡位片蚀的影响

图 3 表示不同雨强条件下,黄土坡面下坡位(1~3 m)、上坡位(0~1 m)、全坡位(0~3 m)片蚀模数随

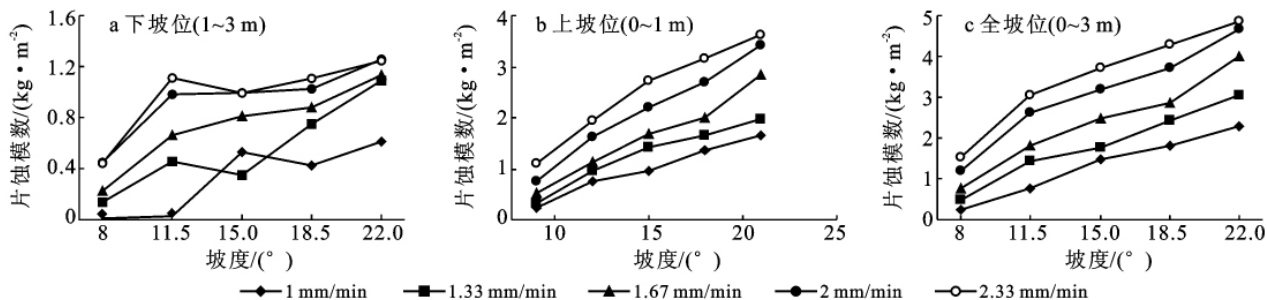


图 3 不同雨强下黄土坡面不同坡位片蚀模数随坡度的变化

表 3 黄土坡面下坡位(1~3 m)片蚀模数随坡度变化的经验方程

| 雨强/ (mm·min ⁻¹) | 经验方程 | 相关系数 | 显著性水平 |
|--------------------------------|------------------------|--------|-------|
| 1.00 | $Y=0.7610\ln S-1.7076$ | 0.8985 | 0.03 |
| 1.33 | $Y=1.0108\ln S-2.1377$ | 0.9091 | 0.03 |
| 1.67 | $Y=0.9821\ln S-1.8757$ | 0.9769 | <0.01 |
| 2.00 | $Y=0.8128\ln S-1.2243$ | 0.9142 | 0.03 |
| 2.33 | $Y=0.7998\ln S-1.1516$ | 0.8529 | 0.06 |

注:Y 为片蚀模数(kg/m²); S 为坡度(°)。

本试验条件下坡度对坡面片蚀过程的影响颇为复杂。随着坡度的增大,径流流速增大,径流在坡面停留的时间变短,使得入渗量减小,径流侵蚀力增强,片蚀强度增大。但坡度增大,试验小区土壤表面的受雨面积减小,产生的径流量变小,下坡位片蚀强度也就会相应变小。下坡位片蚀随坡度的变化首先就在这种增大与减小的综合作用中形成,这种作用决定了下坡位片蚀随坡度变化的总趋势。由于坡面下坡位片蚀是在上坡位产流、上坡位汇流及汇沙共同作用下产生,而这些因子对下坡位片蚀的作用不可能都很规律地随坡度变化,所以坡面下坡位片蚀与坡度的关系也就必然会呈现出较大的波动性。

坡度的变化特征。从图 3 可以看出,随着坡度的增大,坡面不同坡位的片蚀模数增大,全坡位和上坡位的片蚀模数的变化较下坡位的片蚀模数的变化呈现更规律的增大趋势。下坡位片蚀模数的整体变化趋势是增大的,但在 2 个小雨强(1, 1.33 mm/min)时波动性比较大,在 1 mm/min 雨强和坡度小于 12°时侵蚀量很小,在 2.33 mm/min 的雨强下坡度超过 12°时有减小的趋势。不同雨强下的下坡位片蚀模数皆为正数,说明试验条件下坡面下坡位没有发生沉积。

对不同雨强条件下黄土坡面下坡位的片蚀模数和坡度的关系进行统计分析,结果表明,二者呈现很好的对数关系(见表 3)。

2.4 雨强及坡度对黄土坡面下坡位片蚀的综合影响

本试验研究的下垫面条件一致,影响片蚀模数的因子只有雨强和坡度,片蚀强度的变化受二者的综合影响。对坡面下坡位片蚀的全部观测结果进行统计分析,发现片蚀模数与雨强和坡度的关系可用二元线性方程描述,相关性高度显著。经验方程为:

$$Y=0.4523I+0.0641S-1.0266 \quad (1)$$

$(R^2=0.8698, sig.<0.01)$

式中:Y——坡面下坡位片蚀模数(kg/m²); I——降雨强度(mm/min); S——坡度(°)。

从式(1)可以看出,坡面下坡位片蚀模数随雨强和坡度的增大而增大,这与前面的结果一致。由式(1)的系数大小判断得知,雨强对片蚀的影响远大于坡度的影响。

2.5 黄土坡面上坡位汇流输沙和下坡位产流对下坡位片蚀的影响及贡献

从以上分析得知,坡面下坡位片蚀过程受上坡位汇流输沙和下坡位自身产流的影响。对坡面下坡位片蚀全部观测结果进行统计分析,发现下坡位片蚀模数可用上坡位汇流与下坡位产流之和以及上坡位输沙量的二元线性方程进行描述,相关性显著。经验方程为:

$$Y=0.0188H-0.0067L+0.3391$$

$$(R^2=0.8242, \text{sig.} < 0.01) \quad (2)$$

式中: Y ——坡面下坡位片蚀模数(kg/m^2); H ——坡面上坡位汇流与下坡位产流之和(mm); L ——坡面上坡位输沙模数(kg/m^3)。

从式(2)可以看到,坡面下坡位片蚀模数与上坡位汇流和下坡位产流之和呈正相关关系,但与上坡位输沙量呈负相关关系,说明增加的上坡位挟沙水流含沙量对下坡位的侵蚀强度起负面影响。含沙量大,含沙水流饱和度大,其对下坡位土壤的分离作用弱,侵蚀强度小;含沙量小,含沙水流饱和度低,其对下坡位土壤的分离作用就强,侵蚀强度也就大。

为了探讨水、沙对坡面下坡位片蚀影响的相对贡献大小,可以运用式(3)^[12]进行分析:

$$P_i = \frac{R^2}{\sum_{i=1}^n \beta_i^2} \cdot \beta_i^2 \times 100\% \quad (3)$$

式中: P_i ——第 i 个因素的贡献率; R^2 ——复相关系数; $\beta_i = b_i \frac{\sigma_i}{\sigma_y}$, b_i 为第 i 因素的回归系数, σ_i 为第 i 个因素的均方差, σ_y 为因变量的均方差。

根据式(3)对式(2)中 2 个因子对片蚀的影响和贡献作进一步的分析,得出坡面上坡位汇流和下坡位产流对下坡位片蚀的贡献率为 56.9%,上坡位输沙的贡献率为 25.4%,其余 17.7%的贡献率来自其它因素。说明在坡面下坡位侵蚀过程中,水的作用显著大于沙的作用,因此,要有效治理坡面下坡位片蚀,应重视对水的控制,可采取减少坡面上坡位汇流,减少下坡位产流,增加降雨就地入渗等措施。

3 结论

(1) 坡面下坡位片蚀特征与坡面上坡位及全坡面片蚀特征存在差异,下坡位片蚀规律性较差,因此,观测分析小区平均片蚀特征的试验方法不能揭示坡面不同坡位的实际侵蚀变化过程。

(2) 坡面下坡位片蚀随降雨过程、雨强和坡度的变化均呈现明显的波动性,总体上随降雨过程先增大后稳定,随雨强及坡度的增大而增大,在小雨强和小坡度时波动较大,雨强和坡度对坡面下坡位片蚀的影

响均可用对数方程描述。

(3) 坡面下坡位片蚀模数与雨强和坡度的关系可用二元线性方程很好地描述,雨强对其的影响远大于坡度。

(4) 坡面上坡位汇流与下坡位产流之和以及上坡位输沙对下坡位片蚀模数的影响可用二元线性方程描述,其中前者与下坡位片蚀成正相关关系,贡献率为 56.9%,后者与下坡位片蚀呈负相关关系,贡献率为 25.4%,水的作用显著大于沙的作用,表明减少坡面水流可有效控制下坡位片蚀。

[参 考 文 献]

- [1] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类[J]. 土壤学报, 1956, 4(2): 99-115.
- [2] Cheng J C. Vertical belts of runoff action in slope[M]. Beijing: Science Press, 1965.
- [3] 刘元保, 朱显谟. 黄土高原土壤侵蚀垂直分带性研究[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988(7): 5-8.
- [4] 肖培青, 郑粉莉. 上方汇水汇沙对坡面侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报 2003, 17(3): 25-27.
- [5] 郑粉莉, 康绍忠. 黄土坡面不同侵蚀带侵蚀产沙关系及其机理[J]. 地理学报, 1998, 53(5): 422-428.
- [6] 陈浩. 上坡来水在坡面产沙中的作用[C]//第二次全国水土保持学术讨论会论文集. 北京: 林业出版社, 1992: 75-87.
- [7] 陈浩. 降雨特征和上坡来水对产沙的综合影响[J]. 水土保持学报, 1992, 6(2): 17-23.
- [8] 承继成. 坡地流水作用的分带性[C]//中国地理学会 1963 年学会论文集. 北京: 科学出版社, 1965: 99-104.
- [9] 徐雪良. 韭园沟流域沟间地、沟谷地来水来沙量的研究[J]. 中国水土保持, 1987(8): 23-26.
- [10] 焦菊英, 刘元宝, 唐克丽. 小流域沟间地与沟谷地径流泥沙来量的探讨[J]. 水土保持学报, 1992, 6(2): 24-28.
- [11] Zheng F L, Huang C H, Norton L D. Vertical hydraulic gradient and run-on water and sediment effects on erosion processes and sediment regimes[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2000, 64(1): 4-10.
- [12] H. N. 霍洛特. 农业生产效果预测[M]. 谭锦维, 刘天福, 译. 北京: 农业出版社, 1983.