

黄土坡面下坡位土壤侵蚀过程的模拟试验

谭贞学¹, 王占礼^{1,2†}, 马春艳², 刘俊娥², 袁殷²

- (1. 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;
2. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室: 712100, 陕西杨凌)

摘要 在中国科学院水利部水土保持研究所, 采用2个不同坡长小区内模拟降雨试验方法, 对黄土坡面下坡位侵蚀过程进行研究。结果表明: (1) 坡面下坡位侵蚀模数随降雨过程、降雨强度及坡度的变化均具有大小交错, 上下波动的特征, 侵蚀模数随降雨过程的变化总体呈先上升后趋于稳定的态势, 随降雨强度的增大而增加, 随坡度的增大而先增大后减小, 再增大再减小; (2) 坡面上、下坡位侵蚀模数随降雨过程、坡度及降雨强度的变化均具有明显差异, 下坡位明显不如上坡位; (3) 坡面上坡位汇流和下坡位产流与坡面上坡位输沙对坡面下坡位侵蚀模数的影响可用二元线性方程很好地描述, 前者的贡献率为47.8%, 后者为20.4%; 只通过观测分析小区平均侵蚀特征得出的坡面侵蚀过程, 掩盖了坡面下坡位的真实侵蚀过程, 采取水土保持措施减少坡面上坡位汇流及增加降雨就地入渗, 可以有效地治理坡面下坡位的水土流失。

关键词 黄土; 坡面; 下坡位; 土壤侵蚀过程; 汇流; 输沙

Simulated-rainfall experimental research on soil erosion processes on downslope segment of loess hillslope

Tan Zhenxue¹, Wang Zhanli^{1,2}, Ma Chunyan², Liu Jun'e², Yuan Yin²

- (1. State Key Lab. of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources;
2. State Key Lab. of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A & F University: 712100, Yangling, Shaanxi, China)

Abstract In the process of water erosion, runoff and sediment yield vary with the different segments of a hillslope. Clarifying the mechanism of erosion processes can provide a scientific basis for soil and water conservation measures. In this study, erosion processes on downslope were investigated using two flumes with different lengths under simulated rainfall. Results showed that 1) downslope erosion intensity varied with rainfall process, rainfall intensity, and slope gradient, characterized by up-down fluctuations. 2) Erosion intensity varying with rainfall process, slope, and rainfall intensity between different segments on the same slope was obviously different. 3) Runoff from both of the upslope and the downslope and sediment on the upslope had impacts on erosion intensity on the downslope and the impacts could be well described with a linear equation, with the former contribution being 47.8% and the latter, 20.4%. It can be concluded that only observation and analysis of average erosion characteristics cover up the detailed erosion processes. Taking soil and water conservation measures to reduce flow concentration from upslope and increase rainfall infiltration can effectively control soil erosion on downslope.

收稿日期: 2008-04-24 修回日期: 2008-12-16

项目名称: 国家973计划课题“不同类型区土壤侵蚀过程与机理”(2007CB407201); 中科院知识创新工程重要方向项目“黄河多沙粗沙来源区小流域水土流失过程与机理研究”(KZCX2-YW-442); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室自主研究项目“黄土高原近万年来土壤侵蚀发生演变与趋势预测”; 西北农林科技大学创新团队建设计划“黄土高原土壤侵蚀及其治理环境效应评价”(01140202)

第一作者简介: 谭贞学(1983—), 女, 硕士研究生。主要研究方向: 土壤侵蚀过程。E-mail: babycat999@126.com

† 责任作者简介: 王占礼(1960—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 土壤侵蚀过程及预报模型。E-mail: zwang@nwsuaf.edu.cn

Key words loess; hillslope; downslope segment of hillslope; soil erosion process; flow concentration; sediment load

我国黄土地区是全球土壤侵蚀最严重区域,该区强烈的土壤侵蚀不仅给当地生态环境和可持续发展造成严重破坏和影响,而且也成为黄河泥沙的症结所在,因此,黄土地区的土壤侵蚀问题早已成为各界广泛关注的焦点。土壤侵蚀总是发生在具有一定坡长的坡面上,侵蚀过程也总是表现为具有随时空的动态变化过程,其中,在坡面上的空间变化主要表现为沿不同坡长部位的变化。在侵蚀性降雨过程中,坡面上部的产流产沙不断向坡下汇集,坡面水沙汇集过程形成的沿坡面上、下不同坡位径流率及水流含沙率的差异,必然导致坡面下坡位具有与上坡位不同的侵蚀过程特征。研究揭示黄土坡面下坡位侵蚀过程机制将能进一步发展坡面侵蚀理论,为坡面侵蚀过程模型研发奠定基础,并为黄土地区坡面水土保持措施科学配置及水土流失有效治理提供科学依据。

黄土地区特殊自然条件导致的坡面土壤侵蚀过程具有明显的垂向空间变化特征^[1-2];然而,由于侵蚀过程沿程变化观测手段所限,关于坡面沿程不同坡位侵蚀过程的研究很少开展。以往在野外和室内进行的单一径流小区观测试验,只能代表试验观测坡面上总的或平均的侵蚀过程或相对于径流小区以下坡位的上坡位侵蚀过程,即使有一些不同坡长径流小区观测试验,也由于分析侵蚀规律时,主要研究了相应坡长条件下总的或平均的侵蚀特征,研究取得的土壤侵蚀随坡长的变化规律实际上只反映了从坡顶到坡下不同坡长坡面内的总侵蚀或平均侵蚀随坡长的变化,既没有揭示土壤侵蚀的沿程变化规律,更没有揭示坡面沿程不同坡位上的侵蚀过程。陈浩^[3]通过实测资料,分析得出上坡来水量与不同地貌部位产沙量成指数关系。肖培青等^[4-5]利用室内双土槽径流小区定量研究了上方来水来沙对下方侵蚀产沙的影响。笔者采用室内模拟降雨试验,通过对相同影响因素条件下全坡面及上坡位侵蚀动态变化过程进行观测,分析研究下坡位土壤侵蚀过程,以期阐明坡面侵蚀过程的沿程空间响应过程及挟沙水流侵蚀作用机制。

1 材料与方法

研究在中国科学院水利部水土保持研究所,采

用室内模拟降雨试验方法完成。试验土样取自黄土高原腹地的陕西安塞县,土壤类型为黄绵土。各项试验的前期土壤含水量为 14%,密度为 1.3 g/m³。试验小区宽 40 cm,深 25 cm,装土深度为 22 cm。试验的坡长取 0.8 和 1.2 m 2 个,坡度分别为 10°、15°、20°、25°和 30°,降雨强度为 0.800、1.040、1.700、2.475 和 2.835 mm/min。2 个坡长条件下分别进行不同坡度与降雨强度的组合试验 25 场,试验共进行了 50 个场次,所有试验均重复进行 1 次,总共试验场次为 100 次,分析时取 2 次试验的平均值。各项试验的降雨历时均为 60 min。各次试验中,详细观测产流全过程,开始产流后,对所有观测项目前 15 min 内分别间隔 1、2、3、4、5 min 观测 1 次,以后每隔 5 min 观测 1 次。各次观测分别收集各时段的浑水总量,并通过测定含沙量及泥沙密度,计算出相应的清水径流,进而计算出分析研究需要的不同侵蚀特征。在此基础上,将 0.8 m 坡长小区上的土壤侵蚀观测结果作为 1.2 m 坡长小区上 0~0.8 m 坡段的土壤侵蚀特征,代表该坡长坡面的上坡位土壤侵蚀,将 1.2 和 0.8 m 2 个坡长小区上对应坡度与降雨强度组合条件下的土壤侵蚀观测结果相减,得到 1.2 m 坡长小区上 0.8~1.2 m 坡段的相应土壤侵蚀特征,代表该坡长坡面的下坡位土壤侵蚀,用于进行坡面下坡位土壤侵蚀过程的分析研究。试验为微小区条件下的坡面侵蚀试验,试验结果不能向更大的尺度外推,试验方法不可随意扩展到不同尺度的研究中使用。

2 结果与分析

2.1 坡面下坡位土壤侵蚀模数随降雨过程的变化

将同一坡度不同降雨强度条件下坡面下坡位(0.8~1.2 m 坡段)侵蚀模数随降雨过程变化的试验结果点绘为图(图 1(a))。可以看出,不同降雨强度条件下,坡面下坡位侵蚀模数随降雨过程的变化表现为大小交错,上下波动,总体趋势呈现为先上升后趋于稳定的态势,35 min 内变化幅度较大,15 min 内,出现了负值,侵蚀过程出现了沉积,20 min 内以上升为主,20~35 min 之间具有由下降转上升的变化趋势,35 min 以后变化趋于稳定。至于侵蚀开始产生的时间,则表现为降雨强度越大发生时间越早,相应侵蚀模数也越大。

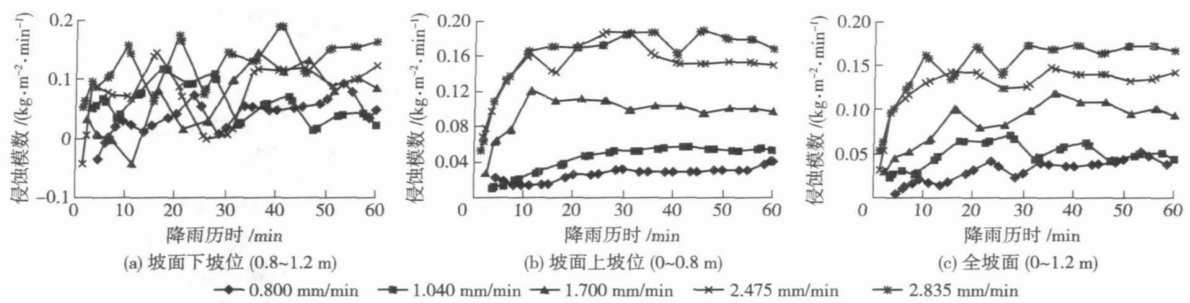


图 1 不同降雨强度条件下土壤侵蚀模数随降雨过程的变化

Fig. 1 Variation of erosion intensity with rainfall processes under different rainfall intensity

图 1(b) 是不同降雨强度条件下坡面上坡位 (0~0.8 m 坡段) 侵蚀模数随降雨过程的变化图, 比较图 1(a) 与图 1(b) 可以看出, 坡面上、下坡位侵蚀模数随降雨历时的变化过程具有明显的差异, 变化特征上坡位明显较下坡位规律。

图 1(c) 是不同降雨强度条件下全坡面 (坡长 0~1.2 m) 侵蚀模数随降雨过程的变化图, 比较图 1(a) 与图 1(c), 也可以看出, 全坡面与坡面下坡位侵蚀模数随降雨历时的变化过程也具有明显的差异, 变化特征全坡面明显较坡面下坡位规律, 说明只通过观测分析坡面径流小区平均侵蚀特征得出的坡面

侵蚀过程, 掩盖了坡面内部沿程不同坡位的真实侵蚀过程, 尤其是坡面下坡位的侵蚀过程。

全坡面条件下, 侵蚀模数随降雨过程的变化总体呈增加趋势, 可用幂函数方程描述^[6-8]。而坡面下坡位侵蚀模数随降雨过程的变化, 由于侵蚀模数大小波动大, 直接用瞬时侵蚀模数进行分析, 相关关系较差, 故采用累积侵蚀模数建立关系。分析表明, 不同降雨强度条件下, 坡面下坡位累积侵蚀模数随降雨过程的变化皆可用线性方程很好地描述, 描述方程及检验结果见表 1。

坡面下坡位侵蚀过程是在降雨打击力、本坡位

表 1 坡面下坡位累积侵蚀模数随降雨过程变化的经验方程

Tab. 1 Statistical equations of accumulated erosion modulus variation with rainfall processes on downslope segment of hillslope

| 坡位/m | 坡度/(°) | 降雨强度/(mm·min ⁻¹) | 方程 | 相关系数 | 显著性水平 |
|---------|--------|------------------------------|---------------------------|-------|-------|
| 0.8~1.2 | 15 | 0.800 | $Y=0.006\ 945t-0.091\ 98$ | 0.944 | 0.01 |
| 0.8~1.2 | 15 | 1.040 | $Y=0.007\ 512t-0.046\ 66$ | 0.995 | 0.01 |
| 0.8~1.2 | 15 | 1.700 | $Y=0.011\ 131t-0.133\ 34$ | 0.923 | 0.01 |
| 0.8~1.2 | 15 | 2.475 | $Y=0.009\ 724t-0.081\ 37$ | 0.945 | 0.01 |
| 0.8~1.2 | 15 | 2.835 | $Y=0.016\ 737t-0.142\ 55$ | 0.959 | 0.01 |

注: Y 为 t 时段内累积侵蚀模数, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{min})$; t 为降雨时间, min 。

产流、上坡位汇流及输沙的共同作用下发生发展的, 不同降雨强度条件下, 下坡位的产汇流径流率均遵循坡面水文过程的规律而增大, 即径流率是在相同净雨率下按照同一汇流原理而发生变化的; 但径流含沙量的变化则比较复杂, 不同大小径流的含沙量并不可能一样, 它们与水流饱和含沙量之差也不可能相同, 有的甚至超过了饱和含沙量, 所以, 来自上坡位的汇流和输沙与在下坡位产流混合后形成的并受雨滴打击扰动的挟沙水流, 其在下坡位产生的侵蚀强弱变化也就并不一定与径流率的大小相对应。因此, 就必然会出现不同降雨强度条件下下坡位侵蚀模数随降雨过程的进行而大小交错, 上下波动, 甚

至沉积, 并且与上坡位较规则的侵蚀变化过程特征形成明显差异的现象。至于总体趋势呈现为先上升后趋于稳定态势的原因, 与单一坡面侵蚀变化过程的原因相类似。

2.2 坡面下坡位侵蚀模数随降雨强度的变化

在坡面降雨侵蚀过程中, 降雨强度大小不仅直接关系到雨滴群体对土体的打击和引起溅蚀的强弱, 而且径流的紊动性、径流强度和径流量的大小在很大程度上也取决于降雨强度^[9]; 因此, 降雨强度无疑是影响土壤侵蚀产生发展过程的重要动力因子。

将不同坡度条件下坡面下坡位 (0.8~1.2 m 坡

段) 侵蚀模数随降雨强度变化的试验结果点绘成图 2(a), 并将分析统计与检验结果列于表 2。由图 2(a) 可以看出, 不同坡度条件下, 坡面下坡位侵蚀模数随降雨强度的变化总体表现为随降雨强度的增大而增加, 但存在着波动起伏与不同坡度条件下的大小交错现象, 其中, 20° 和 25° 条件下, 波动起伏较大, 20° 时, 在试验的最小降雨强度 0.800 mm/min 条件下, 侵蚀模数出现负值, 侵蚀过程表现为沉积, 25°

时, 小降雨强度条件下的侵蚀模数随降雨强度增大而迅速增加, 中降雨强度时增大趋势较缓, 大降雨强度时又急剧增大。10°、15° 和 30° 条件下, 随降雨强度增大, 侵蚀模数总的以大体相近的趋势逐渐增加, 其中 10° 时, 侵蚀模数先有减小, 之后随降雨强度增大呈直线增加。从表 2 可以看出, 不同坡度条件下坡面下坡位侵蚀模数随降雨强度的变化均可用线性方程描述, 且具有较好的显著性水平。

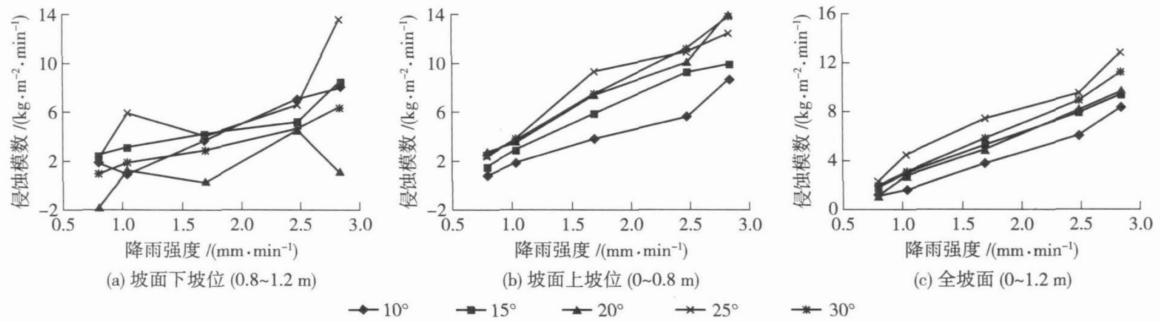


图 2 不同坡度条件下土壤侵蚀模数随降雨强度的变化

Fig. 2 Variation of erosion intensity with rainfall intensity under different slope gradient

表 2 坡面下坡位侵蚀模数随降雨强度变化的经验方程

Tab. 2 Statistical equations of erosion modulus variation with rainfall intensity on downslope segment of hillslope

| 坡位/m | 坡度/(°) | 方程 | 相关系数 | 显著性水平 |
|---------|--------|----------------------|---------|-------|
| 0.8~1.2 | 10 | $E = 0.034I - 0.018$ | 0.976 6 | 0.01 |
| 0.8~1.2 | 15 | $E = 0.025I + 0.003$ | 0.929 8 | 0.05 |
| 0.8~1.2 | 20 | $E = 0.017I - 0.019$ | 0.638 3 | 0.24 |
| 0.8~1.2 | 25 | $E = 0.040I - 0.006$ | 0.807 5 | 0.10 |
| 0.8~1.2 | 30 | $E = 0.024I - 0.009$ | 0.985 0 | 0.01 |

注: E 为土壤侵蚀模数, kg/m^2 ; I 为降雨强度, mm/min 。

图 2(b) 示出不同坡度条件下坡面上坡位 (0 ~ 0.8 m 坡段) 侵蚀模数随降雨强度的变化。比较图 2(a) 与图 2(b) 可以看出, 坡面上、下坡位侵蚀模数随降雨强度的变化具有较明显的差异, 变化特征上坡位较下坡位规律。

图 2(c) 示出不同坡度条件下全坡面 (坡长 0 ~ 1.2 m) 侵蚀模数随降雨强度的变化。比较图 2(a) 与图 2(c) 也可以看出, 全坡面与坡面下坡位侵蚀强度随降雨强度的变化也具有较明显的差异, 变化特征全坡面较坡面下坡位规律, 同样可说明, 只通过观测分析坡面径流小区平均侵蚀特征得出的坡面侵蚀过程, 掩盖了坡面内部沿程不同坡位的真实侵蚀过程, 尤其是坡面下坡位的侵蚀过程。

由于不同降雨强度具有不同大小的雨滴直径,

所以降雨强度大小既包含了雨滴速度的大小, 也包含了降雨质量的不同, 它们综合体现为降雨动能的差异。当降雨强度增大时, 相同降雨时间内降雨量增大, 具有不同雨量的降雨, 地面产流产沙就会有很大差异, 而降雨强度增大, 雨滴直径也增大, 雨滴到达地面的速度增大, 雨滴动能增强, 打击地面造成土壤溅蚀形成土壤分离的量就增大, 又因强烈的雨滴击溅使地表土壤板结严重, 地表孔隙度减小, 土壤入渗率减小而增大了坡面径流, 形成径流冲刷并带走松散土壤导致土壤流失的量相应增大; 所以, 坡面下坡位侵蚀模数随降雨强度的变化总体上必然表现为随降雨强度的增大而增加。同样, 也由于坡面下坡位受到降雨打击力、本坡位产流、上坡位汇流及输沙的共同作用, 尤其在具有不同饱和差 (饱和含沙量与实际含沙量之差) 的挟沙水流作用, 出现了侵蚀模数随降雨强度而波动、在不同坡度条件下上下交错、一定降雨强度坡度组合条件下沉积以及与上坡位变化特征相比, 规律性较差并形成较明显差异等现象。

2.3 坡面下坡位侵蚀模数随坡度的变化

坡度是影响侵蚀的另一重要因子。以往关于坡度与坡面侵蚀作用的研究结果, 总体上是侵蚀随坡度增大而增加, 当超过临界坡度后, 侵蚀随坡度增大反而减小^[10-13]。

将不同降雨强度条件下坡面下坡位 (0.8 ~ 1.2

m 坡段) 侵蚀模数随坡度变化的试验结果点绘成图 3(a)。可以看出, 不同降雨强度条件下, 坡面下坡位侵蚀模数随坡度的变化, 总体表现为随坡度的增大而先增大后减小, 再增大后再减小, 大小有所交错, 强弱交替波动, 变化趋势基本一致。侵蚀模数在坡度小于 15 时, 在不同降雨强度条件下随坡度增加而增大, 随后急剧减小, 至 20 时达到最小值, 其中, 0.800 mm/min 降雨强度时出现负值, 表现为沉积过程, 之后又迅速增大, 至 25 时出现最大值, 随后又减小。

图 3(b) 示出不同降雨强度条件下坡面上坡位 (0~0.8 m 坡段) 侵蚀模数随坡度的变化。比较图 3

(a) 与图 3(b) 可以看出, 坡面上、下坡位侵蚀模数随坡度的变化具有较明显的差异, 变化特征为上坡位较下坡位规律。

图 3(c) 示出不同坡度条件下全坡面 (坡长 0~1.2 m) 侵蚀模数随坡度的变化。比较图 3(a) 与图 3(c) 也可以看出, 全坡面与坡面下坡位侵蚀模数随坡度的变化也具有较明显的差异, 变化特征为全坡面较坡面下坡位规律, 同样说明, 只通过观测分析坡面径流小区平均侵蚀特征得出的坡面侵蚀过程, 掩盖了坡面内部沿程不同坡位的真实侵蚀过程, 尤其是坡面下坡位的侵蚀过程。

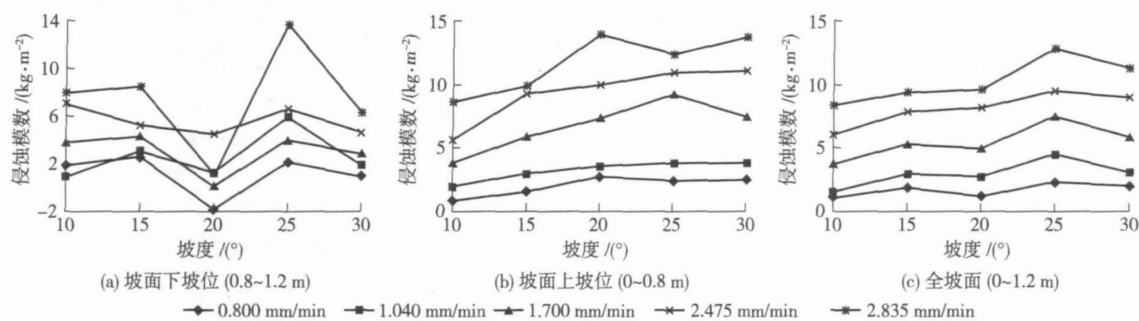


图 3 不同降雨强度条件下土壤侵蚀模数随坡度的变化

Fig. 3 Variation of erosion intensity with slope gradient under different rainfall intensity

坡面下坡位侵蚀模数随坡度的上述变化是水、沙、土体对坡度变化响应后共同作用的结果。从最小试验坡度开始, 随着坡度的增加, 坡面水流速度加快, 侵蚀能力增大, 同时土体稳定性下降, 土壤抵抗侵蚀能力削弱, 最终导致随坡度增大侵蚀模数也相应增大。图 3(a) 中, 坡度在 10°~15° 之间, 侵蚀模数随坡度的变化就与之相符。另外, 随坡度增大, 单位斜面面积上受雨面积减少, 承雨强度降低, 侵蚀模数因此还会变小。事实上, 坡度对侵蚀的影响就表现在这二方面作用的消长中。当坡度增大到一定程度后, 坡度增大, 侵蚀的作用已不能抵消由于坡面斜面积增大, 单位斜面积上降雨强度变小导致的削弱侵蚀作用的功效; 因此, 总的侵蚀模数反而开始减小, 图 3(a) 中, 25°~30° 之间侵蚀模数随坡度的变化特征就是这种此消彼长的作用结果。挟沙水流含沙量与饱和含沙量之差的大小, 在侵蚀过程中具有重要作用, 随坡度增大, 坡面上坡位侵蚀增强, 上坡位汇流输沙率增大, 含沙量增高, 与饱和含沙量之差减小, 甚至超过饱和含沙量, 必然使下坡位侵蚀减小, 甚至出现沉积, 但随坡度继续增大, 径流输沙能力继续增强, 又使得上坡位汇流含沙量与饱和含沙量之差增大, 挟沙水流侵蚀能力随之增强; 因此, 坡

面下坡位侵蚀又随坡度的继续增大而增加, 图 3(a) 中, 15°~20°~25° 之间侵蚀模数随坡度的变化特征很大程度上就是这种挟沙水流的挟沙能力与含沙量之差变化的作用结果。也正是由于坡面上坡位汇流及输沙的共同作用, 尤其是具有与饱和含沙量之差不同的挟沙水流的作用, 使得不同降雨强度条件下坡面下坡位侵蚀模数随坡度的变化与上坡位变化特征相比, 规律性较差并形成较明显差异等现象。

2.4 坡面下坡位侵蚀模数随坡度及降雨强度的变化

坡度是影响侵蚀的重要地形特征因子, 降雨强度则是影响侵蚀的主要降雨特征因子, 在其他条件一定的情况下, 侵蚀模数的大小是随二者的综合作用而变化的。将不同坡度、不同降雨强度条件下坡面下坡位侵蚀全部试验结果进行统计分析, 得出经验方程

$$D = 0.0279I - 4.7 \times 10^{-5}S - 0.00875$$

$$R^2 = 0.48, F = 9.98 > F_{0.01}(2, 22) = 5.72 \quad (1)$$

式中: D 为坡面下坡位土壤侵蚀模数, kg/m^2 ; S 为坡度, ($^\circ$)。

分析结果表明, 坡面下坡位侵蚀模数随坡度及降雨强度的变化可用二元线性方程描述。式(1)表明, 降雨强度对坡面下坡位侵蚀模数的影响远大于

坡度的影响。

2.5 坡面上坡位汇流输沙与下坡位产流对下坡位侵蚀模数的影响及其贡献

坡面下坡位侵蚀是本坡位产流、上坡位汇流及输沙共同作用的结果。研究坡面上坡位汇流和下坡位产流(即净雨)共同形成的下坡位径流与上坡位输沙对下坡位侵蚀模数的影响及其贡献,可区分出挟沙水流在坡面下坡位侵蚀过程中的水、沙的侵蚀作用。

将不同坡度、不同降雨强度条件下坡面下坡位侵蚀模数全部试验结果进行统计分析,得出经验方程

$$D = 7.05 \times 10^{-4} H - 0.49257 T - 0.02142$$

$$R^2 = 0.68, F = 23.635 > F_{0.01}(2, 22) = 5.72 \quad (2)$$

式中: D 为坡面下坡位土壤侵蚀模数, kg/m^2 ; H 为坡面上坡位汇流与下坡位产流之和, mm ; T 为坡面上坡位输沙量, kg/m^2 。

分析与检验结果表明,坡面上坡位汇流和下坡位产流与坡面上坡位输沙对坡面下坡位侵蚀强度的影响可用二元线性方程描述,且相关关系高度显著。

由式(2)可以看出,坡面下坡位侵蚀强度与坡面上坡位汇流和下坡位产流呈正相关关系,与坡面上坡位输沙量呈负相关关系,表明挟沙水流在坡面下坡位侵蚀过程中,含沙量越小侵蚀越强,含沙量越大侵蚀越弱,甚至产生沉积。

式(2)中每个自变量对因变量影响的贡献可用下式^[14]计算:

$$P_i = \frac{R^2}{n} \frac{2}{i} \times 100\%$$

式中: P_i 为第 i 个因素的贡献率; R^2 为复相关系数;

$i = b_i \frac{1}{y}$, b_i 为第 i 个因素的回归系数, i 为第 i 个因素的均方差, y 为因变量的均方差。

计算结果是,坡面上坡位汇流和下坡位产流对坡面下坡位侵蚀影响的贡献率为 47.8%,坡面上坡位输沙对坡面下坡位侵蚀影响的贡献率为 20.4%,其余 31.8% 的贡献率由其他因素引起。该结果也表明,挟沙水流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,采取水土保持措施减少坡面上坡位汇流,增加降雨就地入渗可以有效地治理坡面下坡位水土流失。

3 结论

1) 同一坡度(15°)不同降雨强度条件下,坡面下

坡位侵蚀模数随降雨过程的变化大小交错,上下波动,总体趋势呈现为先上升后趋于稳定的态势。不同降雨强度条件下,坡面下坡位累积侵蚀模数随降雨过程的变化皆可用线性方程很好地描述。

2) 不同坡度条件下,坡面下坡位侵蚀模数随降雨强度的变化,总体上表现为随降雨强度的增大而增加,但存在着波动,以及不同坡度条件下的侵蚀模数大小交错。不同坡度条件下,坡面下坡位侵蚀模数随降雨强度的变化均可用线性方程较好地描述。

3) 不同降雨强度条件下,坡面下坡位侵蚀模数随坡度的变化,总体上表现为随坡度的增大而先增大后减小,再增大再减小,大小有所交错,强弱交替波动,变化趋势基本一致。

4) 坡面下坡位侵蚀模数随坡度及降雨强度的变化可用二元线性方程描述,降雨强度对坡面下坡位侵蚀模数的影响远大于坡度的影响。

5) 坡面上、下坡位侵蚀模数随降雨过程、坡度及降雨强度的变化均具有明显差异,变化特征上坡位明显较下坡位规律。只通过观测分析坡面径流小区平均侵蚀特征得出的坡面侵蚀过程,掩盖了坡面内部沿程不同坡位的真实侵蚀过程,尤其是坡面下坡位的侵蚀过程。

6) 坡面下坡位侵蚀模数对坡面上坡位汇流和下坡位产流与坡面上坡位输沙的响应可用二元线性方程很好地描述,其中,前者呈正相关关系,贡献率为 47.8%,后者呈负相关关系,贡献率为 20.4%。表明挟沙水流在坡面下坡位侵蚀过程中,含沙量越小侵蚀越强,含沙量越大侵蚀越弱,甚至产生沉积,水的作用远大于沙的作用;因此,采取水土保持措施减少坡面上坡位汇流,增加降雨就地入渗可以有效地治理坡面下坡位的水土流失。

4 参考文献

- [1] 肖培青,郑粉莉,史学建. 黄土坡面侵蚀垂直分带性及其侵蚀产沙研究进展. 水土保持研究, 2002, 9(1): 46 - 48
- [2] 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. 地理学报, 1998, 53(5): 422 - 428
- [3] 陈浩. 降雨特征和上坡来水对产沙的综合影响. 水土保持学报, 1992, 6(2): 17 - 23
- [4] 肖培青,郑粉莉. 上方汇水汇沙对坡面侵蚀过程的影响. 水土保持学报, 2003, 17(3): 25 - 27
- [5] 肖培青,郑粉莉. 上方来水来沙对细沟侵蚀产沙过程的影响. 水土保持通报, 2001, 21(1): 23 - 25

(下转第 28 页)

3) 将冻融区以年平均气温为指标的分级图和以平均气温年较差为指标的分级图进行叠加分析,得到冻融区冻融强度分级的分布图,在此基础上,以我国现有的地貌区划和自然区划为依据,划分出作用强度等级,然后再根据其他影响因素进行定性的分析,最后对冻融区进行分区。我国冻融区分为东北高山、丘陵强度冻融区,青藏高原强度冻融区,西北黄土高原中度冻融区,北方山地、丘陵中度季节冻融区,南方丘陵轻度季节瞬时冻融区。

4 参考文献

- [1] 张建国,刘淑珍. 界定西藏冻融侵蚀区分布的一种新方法. 地理与地理信息科学, 2005, 21(2): 32 - 34
- [2] 林燕,谢云,王晓岚. 土壤水蚀模型中的融雪侵蚀模型研究. 水土保持学报, 2003, 17(3): 16 - 20
- [3] Mostaghimi S, Young R A, Wilts A R, et al. Effects of frost action on soil aggregate stability. Transactions of the ASAE, 1988, 31(2): 435 - 439
- [4] Sharratt B S, Lindstrom M J, Benoit G R. Runoff and soil erosion during spring thaw in the northern U. S. corn belt. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 55(4): 487 - 494
- [5] 刘秉正,吴发启. 土壤侵蚀. 西安:陕西人民出版社, 1997: 185 - 195
- [6] 陈雷,焦居仁,刘震,等. 中国土壤侵蚀图册. 北京:中国标准出版社, 2002
- [7] 范昊明,蔡强国. 冻融侵蚀研究进展. 中国水土保持科学, 2003, 1(4): 50 - 55
- [8] 郭东信. 中国冻土. 兰州:甘肃教育出版社, 1990
- [9] 徐学祖,王家澄. 中国冻土分布及其地带性规律的初步探讨. 第二届全国冻土学术会议论文选集. 兰州:甘肃人民出版社, 1983
- [10] 董瑞琨,许兆义. 含水量变化对冻融指标影响试验研究. 中国水土保持, 2003(8): 12 - 25
- [11] 李述训,南卓铜,赵林. 冻融作用对系统与环境中能量交换的影响. 冰川冻土, 2002, 24(2): 109 - 115
- [12] 王随继. 黄河中游冻融侵蚀的表现方式及其产沙能力评估. 水土保持通报, 2004, 24(6): 1 - 7

(责任编辑:宋如华)

(上接第 17 页)

- [6] 王占礼,黄新会,牛振华,等. 黄土裸坡降雨产流过程试验研究. 水土保持通报, 2005, 25(4): 1 - 4
- [7] 王占礼,王亚云,黄新会,等. 黄土裸坡土壤侵蚀过程研究. 水土保持研究, 2004, 11(4): 84 - 87
- [8] 田凤霞,王占礼,牛振华,等. 黄土坡面土壤侵蚀过程试验研究. 干旱地区农业研究, 2005, 23(6): 141 - 146
- [9] 王占礼,邵明安,常庆瑞. 黄土高原降雨因素对土壤侵蚀的影响. 西北农业大学学报, 1998, 26(4): 101 - 105
- [10] 彭文英,张科利,江忠善,等. 黄土高原坡耕地退耕还草的水沙变化特征. 地理科学, 2002, 22(4): 397 - 402
- [11] 王玉宽. 黄土丘陵沟壑区坡面径流侵蚀试验研究. 中国水土保持, 1993(7): 22 - 24
- [12] 靳长兴. 论坡面侵蚀的临界坡度. 地理学报, 1995, 50(3): 234 - 239
- [13] 吴普特,周佩华. 地表坡度与薄层水流侵蚀关系研究. 水土保持通报, 1993, 13(3): 1 - 5
- [14] 霍洛特. 农业生产效果预测. 谭锦维,刘天福,译. 北京:农业出版社, 1983

(责任编辑:宋如华)