

雨滴击溅对薄层漫流的扰动能力与输沙特征^{*}

李光录¹, 庞小明², 姚 军¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 黄河水利委员会 天水水土保持科学试验站, 甘肃 天水 741000)

摘 要: 采用人工模拟实验, 对黄土雨滴击溅下坡面薄层漫流的流态、扰动能力和输沙特征进行了研究。结果显示: 雨滴击溅作用下坡面薄层漫流的流态既不是层流也不是紊流, 属于雨滴垂向作用下的高度混掺“扰动流”; 泥沙剥蚀量较无雨滴击溅薄层流剥蚀量显著增大, 击溅雨滴直径越大, 泥沙剥蚀量也越大, 呈指数规律变化, 表明雨滴击溅作用是薄层漫流泥沙剥蚀的主要动力。雨滴击溅对薄层漫流的扰动能力随着水流深度和雨滴直径比值的增大呈幂指数关系减小, 当雨滴直径大于薄层漫流水深的 2.5~3.0 倍时, 雨滴击溅对薄层漫流基本无扰动作用。基于雨滴击溅的主要影响因子, 提出了缓坡坡面扰动系数预测方程, 对研究薄层漫流泥沙流失预报模型具有重要意义。

关键词: 雨滴击溅; 薄层漫流; 扰动系数; 泥沙输移

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)02-0024-04

The Disturbed Ability and Sediment Transport of Shallow Flow under Raindrop Impact

LI Guang-lu¹, PANG Xiao-ming², YAO Jun¹

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

2. Tianshui Soil and Water Conservation Experiment Station of YRCC, Tianshui, Gansu 741000, China)

Abstract: By using the artificial rainfall, the shallow flow pattern, disturbed ability and sediment transport on slope surface were studied under the raindrop impact. The results showed the shallow flow pattern on slope surface under raindrop impact namely wasn't the laminar flow, also wasn't turbulent flow, but belonged to highly mixed disturbed flow under raindrop vertical impacts. The sediment detachment of shallow flow under raindrop impact was obviously bigger than that under no raindrop impact, the bigger was the impacting raindrop diameter, the higher was the amount of sediment detachment, both assumes the index rule change, indicating that the raindrop impacts were the main power to lead to the sediment transport on the shallow flow of slope surface. The disturbed ability of raindrop splashes to the shallow flow decreased with the exponential relations, as the flow depth and the raindrop diameter ratio increased. When the raindrop diameter is 2.5 to 3 times greater than the depth of shallow flow, the raindrop splashes to the shallow flow were basic non-disturbed function. Based on the major effect factors on raindrop splashes, this paper proposed a forecast equation for the disturbed coefficient on gentle slope surface, which had an important significance to study the sediment forecast model on shallow flow.

Key words: raindrop impact; shallow flow; disturbed coefficient; sediment transport

雨滴打击是指雨滴打击地表和坡面薄层漫流, 使水流发生扰动混掺及土粒的分散和移动过程, 其侵蚀机理十分复杂, 不仅涉及降雨雨滴的大小分布、降落速度, 被击溅土壤粘结力、湿度和入渗能力, 还涉及到上部坡面水流汇集形成薄层漫流的深度、流速、流量, 以及坡面地貌特征。Sharma^[1]、Jayawar-

dena^[2]等通过分析当地雨滴的特征, 提出降雨扰动下坡面薄层漫流的动力学特征, 给出了雨滴中数直径与降雨强度的关系。为了研究人工降雨的相似性, 姚文艺^[3]、吴长文^[4]分析了雨滴降落速度与降落高度的关系, 给出了相应的关系式。吴普特^[5]研究了雨滴击溅对坡面薄层水流阻力系数的影响, 结果

* 收稿日期: 2009-10-16

基金项目: 教育部留学回国启动基金(14110105); 西北农林科技大学校长基金(08080202)

作者简介: 李光录(1964-), 男, 甘肃永靖人, 博士, 副教授, 主要从事土地利用与水土保持研究。E-mail: guangluli@nwsuaf.edu.cn

显示雨滴击溅减小坡面水流阻力系数; 然而, 姚文艺^[6]认为降雨的击溅作用不但增大浅层水流的径流量, 也增大水流阻力。Kinnel 等对非黏性土的雨滴击溅实验显示, 随着薄层水流深度的增加, 雨滴击溅的泥沙剥蚀能力减小^[7-9]。上述研究显示了雨滴击溅对坡面薄层漫流的扰动作用, 但对于雨滴击溅对薄层水流的扰动能力及其泥沙输移特征的研究报道很少, 因此, 研究雨滴击溅扰动下坡面薄层水流的动力学特征, 有助于从动力学角度认识坡面产流和产沙及其侵蚀演变过程的本质原因, 进而为建立水土流失预报模型奠定基础。

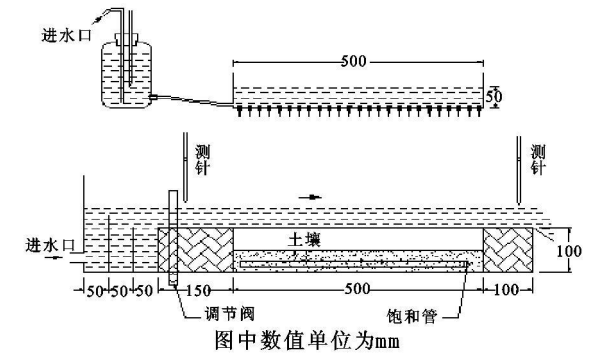


图 1 雨滴击溅坡面薄层水流实验装置示意图

研究采用人工模拟降雨实验, 提出雨滴击溅扰动系数的概念, 并通过模拟不同水深下的雨滴击溅扰动作用下, 坡面薄层水流对土壤侵蚀的机理, 其目的对于研究雨滴作用下泥沙输移的机理, 以及建立为泥沙输移模型的建立都具有重要的理论意义。

1 研究方法

1.1 试验装置

人工模拟降雨装置(见图 1)由雨滴发生装置和薄层水流冲刷装置两部分组成。雨滴发生装置为下

喷式, 其形状为上部开口的长方体, 长 50 cm, 宽 15 cm, 高 10 cm, 在底板上每隔 2 cm 等间距布设 7 号和 9 号针头 138 个, 降雨时, 箱体始终保持有 5 cm 厚恒定水头。薄层水流冲刷装置也是一个长 90 cm, 宽 15 cm, 高 10 cm 的上方开口的长方体。在水槽前后两处各装测针一个, 用于测定水流深度, 底部装调节阀, 用来改变水槽的坡度。在水槽底部以长边中线为界, 向左右各取 25 cm, 制成长 50 cm, 宽 15 cm, 高 10 cm 装土箱体, 以备观测侵蚀。在装土槽底部装有直径 1 cm 的土壤饱和供水管, 以便使供试土壤能够缓慢饱和。整个装置采用单循环系统, 由 5 m³ 蓄水池、水泵、阀门、分水箱、压力表、沉沙池和管道组成, 水槽流量可在 0~ 20 m³/h 间变化。

1.2 试验设计

试验前对雨滴直径、降雨强度、雨滴发生高度和终点速度进行测定和验证。

雨滴直径采用单雨滴法测定。即取试验针头, 在试验水头下, 连续滴 100 滴, 计算单个雨滴重量, 根据水温查出相应水的密度, 计算单个雨滴体积, 根据球体体积, 计算单个雨滴直径。每个针头重复测定 10 次, 去掉一个最大和最小值, 将剩余 8 次取平均值即为该针头直径。每个针号取 10 个针头, 重复上述过程, 计算平均值, 即为该针号的雨滴直径。

降雨强度采用直接法测定。对每一针号所有针头, 连续降雨 10 min, 测定降水体积, 根据降雨面积和降雨时间, 计算降雨强度。每一针号重复测定 10 次, 去掉一个最高值和一个最低值, 将剩下 8 次取平均值, 即为该针号降雨强度。各针号主要降雨特征参数见表 1。

表 1 人工降雨雨滴主要参数

针 号	雨滴直径/mm	下落高度/m	终点速度/(m • s ⁻¹)	降雨强度/(mm • min ⁻¹)	降雨动能/(J • m ⁻² • s ⁻¹)
7	2.68	2	6.08	0.27	0.08
9	3.02	2	6.65	0.79	0.29

表 2 供试土壤主要理化性状

土壤	母质	有机质/%	全氮/	全磷/	颗粒组成/%				
			(g • kg ⁻¹)	(g • kg ⁻¹)	< 2 μm	2~ 10 μm	10~ 50 μm	50~ 100 μm	> 100 μm
壤土	黄土	1.46	1.04	0.62	3.10	28.70	51.10	7.90	9.20

冲刷槽底部装入 5 cm 厚的渭河河沙, 其上再装 5 cm 的风干过筛(5 mm) 杨陵壤土, 装填容重 1.2 g/cm³, 打开土壤饱和供水管, 缓慢供水, 使土壤饱和 12 h, 保证试验过程中无下渗水流出现。供试土壤的理化性质见表 2。

试验是在有雨滴和无雨滴打击下连续进行。首

先调整水槽坡度, 启动水泵, 调节阀, 待水流稳定后, 测定无雨滴打击时前后测针(测针精度为 0.02 mm) 水流深度和流速(示踪法) 各 5 次, 去掉一个最大和最小值, 将剩余 8 次取平均即为该流量水深和流速, 同时连续 5 min 取该水流下每间隔 1 min 薄层水流的水沙量, 经沉淀, 分离、烘干、称重, 计算 5

次平均值,即为该坡度和流量下的水、沙重量;接着保持该水流不变,打开雨滴发生器,重复上述过程,测定雨滴打击下水深和水沙重量。每个测次均需更换表层供试土层。试验采用坡度为 2° 和 4°, 雨强为 0.27, 0.79 mm/min, 水深为 1, 2, 3, 4, 5, 6 mm, 每组重复 4 次,共进行试验 96 组。泥沙收集按《水土保持试验规范》进行。试验过程中均无细沟形成。

2 结果与分析

2.1 雨滴打击下坡面薄层漫流的水流特征

关于坡面薄层水流的流态,人们已经提出了许多不同的观点,分歧很大。Emmett^[10]认为坡面漫流不属于层流、过度流和紊流的任何一种,而把它称为“扰动流”(disturbed flow);江忠善等认为坡面流是介于层流和紊流的过渡流^[11];吴普特和周佩华研究认为坡面流虽然受降雨和坡面糙率扰动,但仍属于层流范畴,为“搅动层流”(disturbed laminar)^[15];雷阿林认为坡面流受下垫面和降雨的影响,即不稳定也不均匀,有急流的特点,流态介于层流和紊流之间^[12];Selby 认为坡面流是层流和紊流的混合^[13]。

通过对 384 次坡度 2° 和 4°, 水深 1~6 mm, 击溅和无击溅薄层水流的实验数据的分析,实验薄层水流平均流速 108~596 mm/s。依据敬向锋等^[17]坡面薄层二元流雷诺数计算方法,以下临界雷诺数 $Re < 575$ 水流流态为层流, $575 \leq Re \leq 6\,500$ 水流流态为过渡流, $Re > 6\,500$ 水流流态为紊流;我们发现雨滴击溅和无击溅下坡面薄层漫流下临界雷诺数 (Re_c) 变化范围为 152~2 529。在理论上只有 1~3 mm 水深时,其雷诺数小于 575,而水深 3~6 mm 水流的雷诺数均大于 575,表明坡面薄层漫流当水深很小的情况下,从理论上讲才可能发生层流。

雨滴击溅薄层漫流的能量来自于上坡汇集的薄

层水流的势能和雨滴下落的动能。雨滴击溅薄层漫流的流态除与床面状况有密切关系外,还与雨滴的垂向打击扰动有关,采用水力学二元流雷诺数或泥沙动力学绕流雷诺数的公式来判别薄层漫流的流态,不适合侵蚀力学中薄层漫流产沙机理研究。故坡面薄层漫流受地表下垫面的影响和雨滴击溅的扰动作用,实际水流质点间混掺十分强烈,因此降雨作用下的薄层水流不是层流、过渡流和紊流,应该属于在雨滴垂向作用下高度混掺的“扰动流”,正是由于这种水流质点的高度混掺,使其对土壤的剥蚀能力变得很强。

2.2 雨滴击溅扰动下坡面薄层漫流的输沙特征

图 2 给出了 2° 和 4° 缓坡坡面上,在雨滴打击和无雨滴打击状态下坡面薄层漫流的产沙和产流情况。从图中能够看出,在无雨滴击溅作用下,2° 和 4° 坡面薄层水流的输沙能力较弱,随着径流率的增加,泥沙剥蚀率从 0.014 和 0.013 增加到 0.38 和 1.57 $g/(m^2 \cdot s)$,且与径流率呈显著的线性规律增加(2° 坡面, $n=31, R^2=0.85$; 4° 坡面, $n=34, R^2=0.67$)。当坡面薄层漫流用不同大小雨滴进行击溅扰动时,其泥沙的剥蚀率产生了很大的差异,2° 和 4° 坡面 2.68 mm 雨滴和 3.02 mm 雨滴击溅泥沙剥蚀率差异极大,当 2.68 mm 雨滴击溅时,随着径流率的增加,泥沙剥蚀率从 0.04 增加到 1.93 $g/(m^2 \cdot s)$, 3.02 mm 雨滴击溅时,泥沙剥蚀率从 0.48 增加到 9.06 $g/(m^2 \cdot s)$,与同等径流率时无击溅薄层水流的泥沙剥蚀率相比,2.68 mm 雨滴击溅下薄层漫流的输沙能力较无雨滴击溅下薄层漫流的输沙能力平均增加 2.24(2° 坡面)和 4.20(4° 坡面)倍, 3.02 mm 雨滴击溅下的输沙能力平均增加 13.48(2° 坡面)和 9.93(4° 坡面)倍;而且,雨滴击溅作用下薄层漫流的泥沙剥蚀率随径流率的增加呈显著的对数曲线增加。

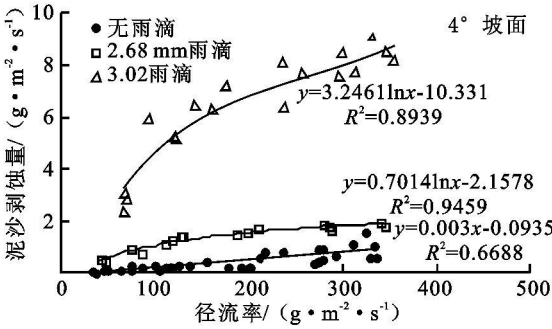
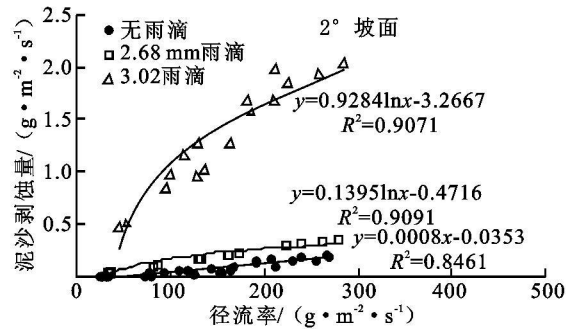


图 2 雨滴击溅下坡面薄层漫流输沙率与径流率的关系

雨滴击溅作用下泥沙剥蚀能力的显著增加表明,雨滴击溅导致坡面薄层漫流水流质点垂向运动能力增加,其对泥沙的剥蚀能力远远大于无击溅薄层水流的剥蚀能力。薄层水流泥沙剥蚀的本质是雨

滴导致的薄层水流水质点间垂向的混掺,这是泥沙剥蚀本质,而薄层漫流的运动主要起到了对剥蚀泥沙的搬运作用。

2.3 雨滴击溅对坡面薄层漫流的扰动能力

雨滴击溅坡面薄层漫流, 使水流水质点垂向混掺能力增强, 其结果导致泥沙剥蚀量极具增加。为了表示雨滴击溅对薄层漫流的扰动作用强弱, 我们将雨滴击溅薄层漫流泥沙的剥蚀率(S_{raindrop})与无击溅水流冲刷时泥沙剥蚀率(S_{flow})的比值作为雨滴的扰动系数(C_r)。

$$C_r = S_{\text{raindrop}} / S_{\text{flow}} \quad (1)$$

通过计算, 得到图 3 雨滴击溅扰动系数与薄层漫流深度和雨滴直径比值关系。从图中能够看出, 雨滴击溅对坡面薄层漫流的扰动能力与薄层漫流深度和雨滴直径的比值呈幂指数减小趋势变化, 且均呈现显著的相关关系($0.79 \leq R^2 \leq 0.86$)。在雨滴直径保持不变时, 雨滴击溅的扰动能力随水深的增大而减小; 在水深保持不变时, 雨滴击溅的扰动能力随雨滴直径的增加而增大。

通过进一步分析雨滴击溅对薄层漫流的扰动系数与水流深度的关系, 发现两个雨滴作用下的扰动系数与薄层水流深度具有极其显著的线性相关关系(2.68 mm 雨滴, $n = 31$, $R = 0.90$; 3.02 mm 雨滴, $n = 34$, $R = 0.94$), 且 2.68 mm 雨滴击溅薄层水流时, 无扰动水流深度 $h_0 = 6.94$ mm, 而 $h_0 = 3.02$ mm 雨滴击溅时的无扰动水流深度 $h_0 = 7.20$ mm, 若将上式分析发现, 雨滴对薄层水流的扰动系数可以统一表达如式(2)。

$$C_r = \alpha(h_0 - h) \quad (2)$$

式中: C_r ——扰动系数(%); h ——薄层水流深度(mm); h_0 ——雨滴击溅作用下无扰动水流的最大深度(mm), 该值与雨滴直径和土壤组成等有关, 可在实验室内测定, 对黄土而言, 该值的变化范围大体在 6.5~8.5 mm 之间; α ——经验系数, 该值的变化与一场降雨的平均雨滴直径、土壤的性质、土壤的含水量等多因子有关, 其中与雨滴的特征和土壤性质关系最密切。可以认为, 当雨滴直径大于水深 2.5~3 倍时, 雨滴对薄层漫流基本无扰动。

Gunn 和 Kinzer^[14] 雨滴降落终点速度与雨滴直径的关系: $v = 5.1 d^{0.4}$, Law 和 Parsons^[15] 提出雨滴平均直径与降雨强度的关系: $d_{50} = 1.88 i^{0.182}$, 后来 Schmidt^[16] 将两个结果分析发现: $v = 6.6 i^{0.07}$, 把上述关系与地表坡度结合, 得到用来预测缓坡薄层漫流扰动系数计算式如式(3)。

$$C_r = 0.657SI^{0.073}(h_0 - h) \quad (3)$$

式中: S ——坡度(弧度); I ——一场降雨的降雨强度(mm/min)。该式对黄土高原缓坡地坡面薄层漫流的预测效果最好。

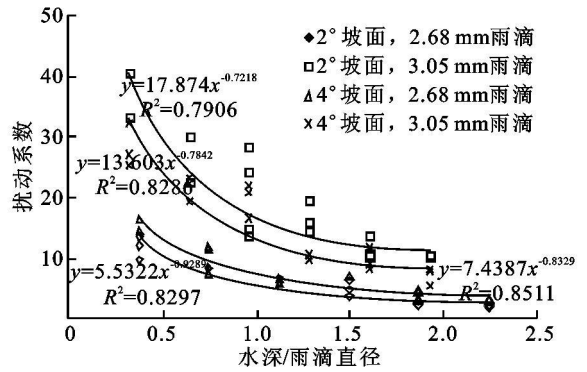


图 3 雨滴击溅对坡面薄层漫流扰动系数与水深和雨滴直径的关系

3 结论

雨滴击溅对坡面薄层漫流的扰动能力与输沙特征研究, 对建立薄层漫流下泥沙流失预报模型具有重要意义。研究采用人工降雨模拟实验装置, 对雨滴击溅下坡面薄层漫流的分析表明: 坡面薄层漫流只有当无雨滴击溅时, 可能出现层流流态, 其对泥沙的剥蚀随水深的增加呈线性增加, 而雨滴击溅作用时, 薄层水流的流态既不是层流也不是紊流, 属于高度垂向扰动作用下的扰动水流, 其泥沙剥蚀量较单纯无雨滴击溅下的薄层层流剥蚀量显著增大, 击溅雨滴直径越大, 剥蚀量也越大, 呈指数规律变化, 表明雨滴击溅作用是薄层漫流泥沙剥蚀的主要动力。

雨滴的击溅扰动作用与雨滴下落速度、雨滴直径、雨滴形状系数, 以及土壤自生的性质关系密切, 研究表明雨滴击溅对坡面薄层漫流的扰动能力与水流深度和雨滴直径的比值呈幂指数规律减小; 当水深保持恒定时, 雨滴击溅对薄层漫流的扰动系数随雨滴直径的增大而增加, 当雨滴直径保持恒定时, 扰动系数随水深的增大而减小。当雨滴直径大于水深的 2.5~3.0 倍时, 雨滴对薄层漫流基本无扰动作用。考虑到雨滴击溅对坡面薄层漫流扰动的主要影响因子, 提出基于缓坡的扰动系数预测方程: $C_r = 0.657SI^{0.073}(h_0 - h)$, 该方程主要适用于黄土高原缓坡坡面漫流。

参考文献:

- [1] Sharma P P, Gupta S C, Foster G R. Raindrop-induced soil detachment and sediment transport from interrill areas[J]. Soil Sci Soc Am, J, 1995, 59: 727-734.
- [2] Jayawardena A W, Rezaur R B. Drop size distributions and kinetic energy load of rainstorms in Hong kong[J]. Hydrol Processes, 2004, 14: 1069-1082.

3 结 论

应用山东全省 22 个气象站点 58 a 间逐日降雨数据, 对该省多年降雨侵蚀力进行计算, 并探寻了侵蚀力的空间分布特征, 同时借助 SPSS 软件建立并验证了山东省年降雨侵蚀力的简易方程, 为方便在该省缺少自记雨量资料地区计算降雨侵蚀力, 更进一步研究全省土壤水蚀对降雨变化响应奠定了基础。

结果显示: 山东省多年年均降雨侵蚀力为 $4\,254.46(\text{J}\cdot\text{mm})/(\text{m}\cdot\text{h})$, 并且呈现由西向东、由北向南递增的规律, 峰值中心出现在鲁东南临沂附近的鲁苏省界。山东省境内 3 个国家级、省级水蚀重点治理区的降雨侵蚀力总体偏高, 未来应加强这 3 个地区降雨侵蚀力变化、针对性防治措施的研究。

参考文献:

[1] Nearing M A, Pruski F F, O’Neal M R. Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 59(1): 43-50.

[2] Yu B, Hashim G M, Eusof Z. Estimating the R- factor using limited rainfall data: a case study from Peninsular Malaysia[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 56(2): 104-105.

[3] Yu B, Rosewell C J. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts for South Australia[J]. Austral-

ian Journal of Soil Research, 1996, 34(5): 724-733.

[4] Bullock P R, Dejong E, Kiss J J. An assessment of rainfall erosion potential in Southern Saskatchewan from daily rainfall records[J]. Canadian Agricultural Engineering, 1989, 32(1): 17-24.

[5] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学, 2003, 25(1): 35-41.

[6] Goovaerts P. Using elevation to aid the geostatistical mapping of rainfall erosivity[J]. Catena, 1999, 34(3/4): 227-242.

[7] 魏义坤, 杨威, 刘静. 关于径向基函数插值方法及其应用[J]. 沈阳大学学报, 2008, 21(1): 7-9.

[8] Franke R. Scattered data interpolation: test of some methods[J]. Mathematics of Computation, 1982, 38: 184-200.

[9] Santhi C, Arnold J G, Williams J R, et al. Application of a watershed model to evaluate management effects on point and nonpoint source pollution[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2001, 44(6): 1559-1570.

[10] Renard K G, Freimund J R. Using monthly precipitation data to estimate the R- factor in the revised USLE[J]. Journal of Hydrology, 1994, 157(4): 287-306.

[11] Yu B, Rosewell C J. A robust estimator of the R- factor for the universal soil loss equation[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1996, 39(2): 559-561.

(上接第 27 页)

[3] 姚文艺, 陈国祥. 雨滴降落速度及终速公式[J]. 河海大学学报, 1993, 21(3): 24-27.

[4] 吴长文, 陈法杨. 坡面土壤侵蚀机理研究进展与现状[J]. 中国水土保持, 1996, 11: 24-24.

[5] 吴普特, 周佩华. 雨滴击溅对坡面薄层水流阻力系数的影响[J]. 水土保持学报, 1994, 8(2): 39-42.

[6] 姚文艺. 坡面流阻力规律研究[J]. 泥沙研究, 1996(3): 74-84.

[7] Kinnel P I A. sediment transport by medium to large drops impacting flows at subterminal velocity[J]. Soil Sci. Soc Am. J., 2005: 69: 902-905.

[8] Kinnel P I A. Sediment concentration resulting from flow depth/drop size interactions in shallow overland flow Trans[J]. ASAE, 1993, 36(4): 1099-1103.

[9] Kinnel P I A. Sediment transport by shallow flows impacted by pulsed artificial rainfall[J]. Aust. J. Soil Sci., 1993, 31: 199-207.

[10] Kirkby M J. Hillslope Hydrology[M]// John Wiley &

Sons. Chinchester New York Brisbane, 1978: 145-293.

[11] 雷阿林. 坡沟系统土壤侵蚀链通力机制模拟实验研究[D]. 陕西 杨陵: 中国科学院水利部水土保持研究所, 1996.

[12] Selby M J. Hillslope materials & processes[M]. Oxford University press, 1993.

[13] Gunn R, Kinzer G D. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air [J]. J. Meteorol., 1949, 6: 243-248.

[14] Laws J O, Parsons D A. The relation of raindrop size to intensity [J]. Eos Trans. AGU, 1943, 24: 452-459.

[15] Schmidt J. Modelling long- term soil loss and landform change, in overland flow [M]//Parsons A J, Abrahams A D. Hydraulics and Erosion Mechanics. New York: Chapman and Hall, 1993: 409-443.

[16] 敬向锋, 吕宏兴, 潘成忠, 等. 坡面薄层水流流态判别方法的初步探讨[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 56-61.