

雨滴击溅下薄层水流的输沙机理研究

李光录¹, 吴发启¹, 赵小风¹, 庞小明²

(1 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 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] 【目的】探讨雨滴打击下薄层漫流的输沙机理, 为建立细沟间薄层水流泥沙输移预报模型提供理论依据。【方法】采用人工模拟降雨试验, 以无雨滴打击为对照, 对黏性土壤在直径 2.68 mm 和 3.02 mm 雨滴击溅作用下, 不同坡度坡面(2°和 4°)细沟间薄层水流深度(h)与土壤侵蚀量、泥沙含沙量、扰动系数(C_r)关系进行了研究。建立了黄土缓坡坡面扰动系数的预测方程。【结果】雨滴击溅下坡面薄层水流土壤侵蚀量较无雨滴击溅时显著增大, 击溅雨滴直径越大, 侵蚀量越大, 与水深呈对数规律变化。在雨滴击溅作用下, 泥沙含沙量随水深的增加呈减小趋势, 且雨滴直径越大, 减小幅度越大, 这与无雨滴击溅时薄层水流的泥沙含沙量变化相反, 表明雨滴击溅作用是薄层水流泥沙输移的主要动力。雨滴击溅作用对薄层水流的扰动系数随水流深度的增大呈线性减小趋势; 对侵蚀性黄土而言, 2.68 mm 雨滴击溅下, 无扰动水深为 6.94 mm; 3.02 mm 雨滴击溅下, 无扰动水深为 7.20 mm。【结论】雨滴击溅作用是薄层水流泥沙剥蚀的主要动力。

[关键词] 薄层漫流; 雨滴击溅; 泥沙输移; 泥沙含沙量; 扰动系数

[中图分类号] S157.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2009)09-0149-06

The mechanics of sediment transport under raindrops impacting shallow overland flow

LI Guang-lu¹, WU Fa-qi¹, ZHAO Xiao-feng¹, PANG Xiao-ming²

(1 College of Resource 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: 【Objective】 This study had an important significance to set up the predicted model fallow overland flow on the Loess Plateau. 【Method】 Using the artificial rainfall, this paper studied the mechanics of sediment transport under raindrops impacting shallow overland flow. The equation was constructed to predict the disturbed coefficient of fallow overland flow by raindrops impact to yellow loam. 【Result】 Sediment detachment rate of sloping fallow overland flow by raindrops impact was higher than that under no raindrops to cohesive soils, the larger the raindrop diameter, the higher the sediment detachment rate, and it had a logarithmic correlation with the depths of sloping fallow overland flow under raindrops impact. Sediment concentrations under raindrops impact decreased as depths of sloping fallow overland flow increased, by contrary, under no raindrops impact sediment concentrations increased as depths of sloping fallow overland flow increased. It indicated the raindrops impact was the drive power for sediment detachment of shallow overland flow. The disturbed coefficients for fallow overland flow under raindrops impact decreased with linear relationship as the depths of shallow overland flow increased; to erosive yellow loam, the non-disturbed depth for fallow overland flow was 6.36 mm under the diameter 2.68 mm raindrops impact, and so was 7.20 mm under the diameter 3.02 mm raindrop. 【Conclusion】 Raindrop impact is the main power to

* [收稿日期] 2008-12-31

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

[作者简介] 李光录(1964—), 男, 甘肃永靖人, 副教授, 博士, 主要从事土地利用与水土保持研究。

E-mail: guangluli@nwsuaf.edu.cn

conduce the sediment detachment of fallow overland flow.

Key words: fallow overland flow; raindrop impact; sediment transport; sediment content; disturbed coefficient by raindrop

雨滴击溅是指雨滴直接打击于地表,使土粒产生分散和移动的过程;薄层径流则是通过对土壤连续分散、悬浮和搬运而形成土壤侵蚀。雨滴击溅和薄层径流同时作用于某一坡面时,其侵蚀过程更为复杂,且侵蚀强度增加。1947年,Foster等将坡面土壤侵蚀区分为细沟与细沟间侵蚀2个单元,且细沟间的侵蚀主要是由雨滴击溅与薄层水流冲刷共同作用的结果^[1]。雨滴打击能够使坡面薄层水流由层流变为紊流或扰动层流,从而增加其侵蚀能力^[2-4]。野外和室内试验也证实,雨滴击溅对侵蚀和泥沙输移具有重要的作用^[5-15]。吴普特等^[2-3]研究认为,坡面薄层水流为“搅动层流”;消除雨滴击溅后,坡面薄层水流侵蚀量可降低80%;Kinzel^[7-12]对非粘性沙土的雨滴击溅试验结果显示,随薄层水流深度的增加,泥沙剥蚀量减小;Gabet等^[16]研究认为,坡面薄层水流与溅蚀关系明显,对侵蚀产沙有较大制约作用。坡面是构成山地丘陵和破碎高原的重要景观单元,而坡面薄层水流产生的拖拽力和雨滴击溅力是导致坡面土壤侵蚀的主要营力,雨滴击溅扰动作用下坡面薄层水流的泥沙输移机理十分复杂,一直是人们研究的难点和热点问题^[17-18]。

在自然条件下,由于影响坡面薄层水流的因子很多,对其侵蚀过程和数量特征的研究多采用室内人工模拟降雨试验进行。但由于目前普遍采用的人工降雨装置无法控制雨滴的大小和薄层水流的深度,这给雨滴击溅下薄层水流侵蚀机理的研究带来了困难。为此,本试验在自行研发雨滴发生和薄层水流冲刷装置的基础上,对不同直径雨滴打击下坡面薄层水流的侵蚀量、泥沙浓度和被扰动系数的关系进行了研究,以期揭示坡面雨滴打击与薄层水流共同作用下,侵蚀泥沙的输移机理,为沟间泥沙输移理论模型的构建提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验装置

人工模拟降雨装置(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。薄层水流冲刷装置是一个长90 cm、宽15 cm、高10 cm上方开口的长方体。在水槽前后两处各装测针1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,水槽流量为0~20 m³/h。

1.2 人工降雨雨滴的主要参数

试验前,对雨滴直径、降雨强度、雨滴下降高度、终点速度和降雨动能进行测定和验证。

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,测算单个雨滴质量,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,去掉一个最大值和最小值,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。

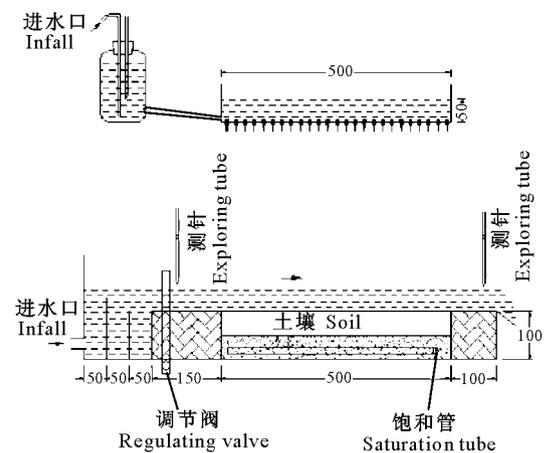


图1 雨滴击溅坡面薄层水流试验装置图(单位:mm)

Fig.1 Schematic of the apparatus used to study the raindrop impacting sloping fallow overland flow (unit: mm)

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。

雨滴终点速度主要取决于雨滴直径和形状,对大雨滴,达到终点速度的高度可达12 m以上。然而,如此降雨高度难以保证雨滴下落过程中,气流水平运动所造成的雨滴偏离水槽现象,若加宽水槽又不能产生理想的薄层水流。为此,通过雨滴降落高度的反复试验,并根据沙玉清修正的牛顿终点速度公式^[19],当雨滴直径 $d \geq 1.9$ mm时,终点速度:

$$V = (17.20 - 0.844d) \sqrt{0.1d}$$

式中: V 为终点速度(m/s), d 为雨滴直径(mm)。通过验证,采用2 m雨滴降落高度,试验终点速度可以达到理论终点速度的要求,且能满足雨滴下落受水平气流影响小,水槽可产生较理想薄层水流。各针号主要降雨特征参数见表1。

表1 人工降雨雨滴的主要参数

Table 1 Main raindrop parameters for artificial rainfall apparatus

针号 Pin number	雨滴直径/mm Raindrop diameter	降落高度/m Descent height	终点速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) Terminal velocity	降雨强度/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) Rainfall intensity	降雨动能/ ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Rainfall kinetic energy
7	2.68	2	6.08	0.273	0.084
9	3.02	2	6.65	0.789	0.291

1.3 供试土壤

冲刷槽底部装入5 cm厚的渭河河沙,其上再装入5 cm厚的风干过孔径5 mm筛的杨凌塬土,装填

容重为 1.2 g/cm^3 ,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。

表2 供试土壤的主要理化性状

Table 2 Characteristics of soil used in the experiments

土壤 Soil	母质 Matter	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) Organic carbon	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) Total nitrogen	全磷/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) Total phosphorus	颗粒组成/% Particle composing				
					<2 μm	2~10 μm	10~50 μm	50~100 μm	>100 μm
塬土 Lou soil	黄土 Loess	14.6	1.04	0.62	3.1	28.7	51.1	7.9	9.2

1.4 试验设计

分别在有雨滴(雨滴直径分别为2.68和3.02 mm)和无雨滴打击下连续进行试验。首先调整水槽坡度,启动水泵,调节阀门,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)水流深度各5次,去掉一个最大值和最小值,将剩余8次取平均值即为该流量和坡度下的水深,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、称质量,计算5次平均值,即为该坡度和流量下的水沙质量;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质量。每个测次均需更换表层供试土层。试验坡度分别为 2° 和 4° ,降雨强度为0.273和0.789 mm/min,水深为1,2,3,4,5和6 mm,每组重复4次,共进行96组试验。泥沙收集按文献^[20]的方法进行;各试验无细沟形成。

2 结果与分析

雨滴击溅坡面薄层水流,将静止坡面土粒溅起进入到水流中,泥沙的输移过程便开始。进入水流的土壤颗粒上升一定高度后,便会下落到坡面,在土粒上升和下落的交替过程中,流动水流对土壤颗粒进行搬运。一旦溅起土粒下落到下游坡面,再一次

的启动将决定下一个雨滴的击溅扰动作用。

2.1 雨滴击溅对不同坡面土壤侵蚀量的影响

图2显示了在 2° 和 4° 坡面上,无雨滴打击及7号针头(雨滴直径2.68 mm)和9号针头(雨滴直径3.02 mm)连续打击薄层水流时,水深与土壤侵蚀量的关系。从图2可以看出,在 2° 和 4° 坡面上,无雨滴击溅时,水深从1 mm增加到6 mm,侵蚀量由0.004和0.013 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 增至0.38和1.57 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,可见坡面薄层水流的土壤侵蚀量随着水深的增加而增大,其线性关系可用下述方程表述:

$$q_s = a_1 h + c_1 \quad (1)$$

式中: q_s 为薄层水流土壤侵蚀量($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), h 为坡面薄层水流深度(mm)系数, c_1 为经验常数。 c_1 与 a_1 的比值给出了试验条件下无雨滴击溅时,薄层水流侵蚀量为0的初始水深 h_0 值。本研究 2° 和 4° 坡面 q_s 与 h 的线性方程分别为 $q_s = 0.0363 h - 0.0494$ ($r^2 = 0.8407$)和 $q_s = 0.1766 h - 0.1824$ ($r^2 = 0.6334$),从其比值可看出, 2° 坡面时, a_1 是经验薄层水流冲刷导致泥沙剥蚀的初始水深 $h_0 = 1.36 \text{ mm}$, 4° 坡面的 $h_0 = 1.03 \text{ mm}$,表明无雨滴击溅时,坡面薄层水流能够启动,泥沙水深随坡度的增加而减小。

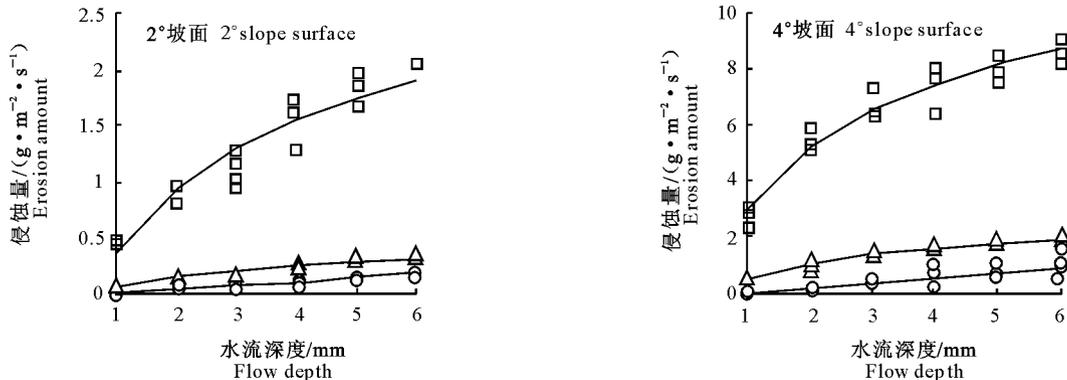


图 2 雨滴击溅下坡面薄层水流深度与土壤侵蚀量的关系

○. 无雨滴; △. 2.68 mm 雨滴; □. 3.02 mm 雨滴

Fig. 2 Relationship between depths of sloping fallow overflows and sediment detachment rate by raindrops impact

○. No raindrop; △. 2.68 mm raindrop; □. 3.02 mm raindrop

当雨滴打击坡面薄层水流时,水流深度与土壤侵蚀量的关系发生显著变化(图 2)。由图 2 可知,(1)雨滴打击薄层水流时,随着水流深度的增加,侵蚀量显著增大;在 2°和 4°坡面,当直径 2.68 和 3.02 mm 雨滴打击 6 mm 深度薄层水流时,土壤的最大侵蚀量是相应坡度无雨滴打击时侵蚀量的 2~6 倍以上,表明雨滴打击能够增强泥沙的剥蚀、输移能力,雨滴直径越大,侵蚀量越大。(2)雨滴打击薄层水流时,土壤侵蚀量与水深呈对数曲线增加,可用下述方程表示:

$$q_s = a_2 \ln h + c_2. \quad (2)$$

式中: a_2 是经验系数, c_2 为经验常数。在 2°坡面,直径为 3.02 mm 雨滴击溅时,泥沙开始剥蚀的初始水深 $h_0 = 0.67$ mm, q_s 与 h 关系为: $q_s = 0.8617 \ln h + 0.3403$, ($r^2 = 0.8857$);直径为 2.68 mm 雨滴击溅时, $h_0 = 0.87$ mm, q_s 与 h 关系为: $q_s = 0.1633 \ln h + 0.022$, ($r^2 = 0.9227$)。在 4°坡面,直径 3.02 mm 雨

滴击溅时,泥沙开始剥蚀的初始水深 $h_0 = 0.39$ mm, q_s 与 h 关系为: $q_s = 3.1765 \ln h + 2.9847$, ($r^2 = 0.9429$);直径为 2.68 mm 雨滴击溅时, $h_0 = 0.60$ mm, q_s 与 h 的关系为: $q_s = 0.8301 \ln h + 0.4188$ ($r^2 = 0.954$)。表明雨滴击溅状态下,导致薄层水流搬运泥沙的初始水流深度较无雨滴击溅薄层水流深度小,且随着雨滴直径和地表坡度的增加,泥沙剥蚀的初始水深减小;薄层水流对泥沙剥蚀动力主要来源于雨滴的击溅,而薄层水流本身对泥沙仅仅起到搬运的作用。

2.2 雨滴击溅对不同坡面泥沙含沙量的影响

雨滴打击能够导致薄层水流泥沙侵蚀量的增加,这主要是由于雨滴击溅使土壤颗粒分散和使薄层水流水质点间的垂向混掺能力增强。为此,将单位时间获得的泥沙质量与其水沙质量之比作为泥沙含沙量,得到雨滴打击下薄层水流深度与泥沙含沙量($\Psi, \%$)的变化规律(图 3)。

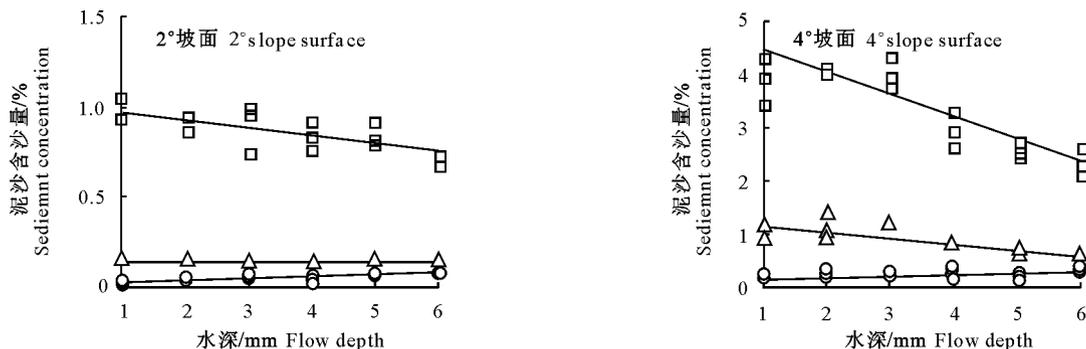


图 3 雨滴击溅坡面薄层水流深度与泥沙含沙量的关系

○. 无雨滴; △. 2.68 mm 雨滴; □. 3.02 mm 雨滴

Fig. 3 Relationship between the depths of sloping fallow overland flow and sediment contents by raindrops impact

○. No raindrop; △. 2.68 mm raindrop; □. 3.02 mm raindrop

从图 3 可以看出,在 2°和 4°坡面,无雨滴击溅作用下,薄层水流泥沙含沙量均随坡面水深的增加而

增大,并呈线性增加的趋势。当水深由 1 mm 增加到 6 mm 时,含沙量分别由 0.01% 和 0.07% 增加到 0.09% 和 0.48%, 增加幅度较小,表明单纯的薄层水流对泥沙的剥蚀、搬运能力极小,其剥蚀、搬运的能量主要来源于水流自身的流动,且受水流流速和流量大小的影响。比较薄层水流冲刷时泥沙含沙量与水深的关系发现,二者具有线性关系,可用下式表示:

$$\Psi = c_3 h + a_3. \quad (3)$$

式中: c_3 为经验系数,其值与坡面坡度有关,经分析发现 $c_3 = 0.311 S$, 其中 S 为坡度(弧度); a_3 为经验常数,其值与土壤自身性质有关。经检验发现,在 4° 坡面,泥沙含沙量与水深的关系不显著 ($\Psi = 0.0224 h + 0.1449, r^2 = 0.1446$); 在 2° 坡面,泥沙含沙量与水深显著相关 ($\Psi = 0.0103 h + 0.0115, r^2 = 0.5389$)。

在雨滴击溅状态下, 2° 坡面,当水深从 1 mm 增加到 6 mm 时,直径 2.68 mm 和 3.02 mm 雨滴击溅下,泥沙含沙量分别从 0.14% 和 1.06% 降低至 0.13% 和 0.72%; 4° 坡面,直径 2.68 mm 和 3.02 mm 雨滴击溅下,泥沙含沙量分别从 1.11% 和 4.33% 降低至 0.53% 和 2.27%。表明在雨滴击溅作用下,雨滴直径越小,泥沙含沙量越小,即薄层水流泥沙含沙量随水深的增加均呈负的线性递减的规律变化,可用下式表示:

$$\Psi = -c_4 h + a_4. \quad (4)$$

除 2° 坡面、2.68 mm 雨滴击溅作用下,泥沙含沙量与水深关系相关性较低外 ($\Psi = -0.0004 h + 0.1353, n=15, r^2 = 0.0667$), 其他情况下,泥沙含沙量与水深关系相关性均达显著水平 (2° 坡面, 3.02 mm 雨滴: $\Psi = -0.0417 h + 1.0111, n=15, r^2 = 0.4021$; 4° 坡面, 2.68 mm 雨滴: $\Psi = -0.1159 h + 1.2611, n=15, r^2 = 0.6899$; 4° 坡面, 3.02 mm 雨滴: $\Psi = -0.4243 h + 4.9164, n=15, r^2 = 0.6004$)。这说明在片蚀过程中,雨滴的打击作用大小还受水流水深的影响。

2.3 雨滴击溅对不同薄层水流扰动系数的影响

雨滴打击下,坡面薄层水流泥沙的剥蚀能力比无雨滴击溅下的剥蚀能力大,且剥蚀规律也有差异。可以认为,雨滴击溅下坡面薄层水流对泥沙剥蚀的动力,主要来源于雨滴的击溅而不是水流的冲刷。为了阐明雨滴打击对薄层水流土壤侵蚀量增加的机理,将雨滴击溅侵蚀量与无雨滴击溅侵蚀量的比值作为雨滴对薄层水流的扰动系数 ($C_r, \%$)。

图 4 表明,不同直径雨滴对薄层水流的扰动作用随水流深度的增加呈减小趋势。随水深增加,直径 3.02 mm 雨滴击溅时的扰动系数比 2.68 mm 雨滴击溅时的扰动系数减小更快。 4° 坡面时,直径 2.68 mm 和 3.02 mm 雨滴的扰动系数与薄层水流深度具有显著的线性相关关系 (2.68 mm 雨滴: $n = 31, r^2 = 0.8054$; 3.02 mm 雨滴: $n = 34, r^2 = 0.8783$)。经计算可知,直径 2.68 mm 雨滴击溅薄层水流时,扰动系数为 0 的水流深度 $h_0 = 6.94$ mm, 而 3.02 mm 雨滴的 $h_0 = 7.20$ mm。雨滴击溅时,薄层水流深度与扰动系数的关系为:

$$C_r = \alpha (h_0 - h). \quad (5)$$

式中: h_0 为雨滴击溅作用下无扰动的水流深度 (mm), 其值与雨滴直径和土壤组成等有关,可在实验室测定; α 为经验系数,其值的变化与降雨的平均雨滴直径、土壤的性质、含水量、地表坡度等因子有关,其中与雨滴特征和土壤性质的关系最为密切。

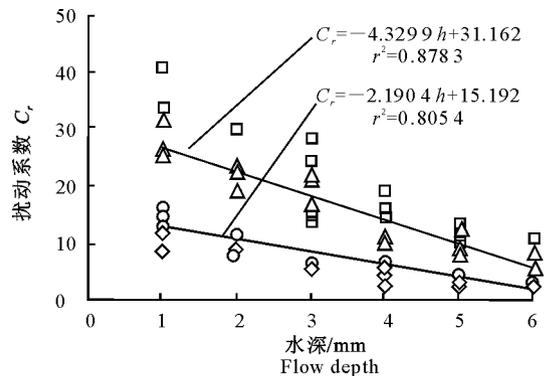


图 4 雨滴击溅下薄层水流深度与扰动系数的关系

◇. 2° 坡面, 2.68 mm 雨滴; □. 2° 坡面, 3.02 mm 雨滴;
○. 4° 坡面, 2.68 mm 雨滴; △. 4° 坡面, 3.02 mm 雨滴

Fig. 4 Relationship between the depths of sloping fallow overland flows and disturbed coefficients by the raindrop impact

◇. 2° slope surface, 2.68 mm raindrop impact;
□. 2° slope surface, 3.02 mm raindrop impact;
○. 4° slope surface, 2.68 mm raindrop impact;
△. 4° slope surface, 3.02 mm raindrop impact

Gunn 等^[21] 研究发现,雨滴降落终点速度 (v) 与雨滴直径 (d) 的关系为 $v = 5.1 d^{0.4}$; Laws 等^[22] 提出,雨滴中数直径 (d_{50}) 与降雨强度 (I) 的关系为: $d_{50} = 1.88 I^{0.182}$; 后来 Schmidt 等^[23] 对以上 2 个结果分析后发现: $v = 6.6 I^{0.07}$ 。本研究将上述关系与地表坡度结合,可以得到预测缓坡薄层水流扰动系数的计算公式:

$$C_r = 0.6565 S I^{0.0728} (h_0 - h). \quad (6)$$

式中: S 为坡度(弧度), I 为降雨强度(mm/min)。

3 结 论

雨滴打击薄层水流侵蚀试验结果表明:(1)无雨滴打击时,坡面薄层水流的侵蚀量随水深的增加呈线性增大,而在雨滴击溅作用下,坡面薄层水属于高度扰动作用下的扰动水流,其土壤侵蚀量较单纯薄层层流侵蚀量显著增大,且击溅雨滴直径越大,侵蚀量越大,两者呈对数变化,表明雨滴击溅作用是薄层水流泥沙剥蚀的主要动力。(2)在雨滴击溅作用下,侵蚀泥沙含沙量随水流深度的增加而呈减小的趋势,且雨滴直径越大,减小趋势越明显,这种变化与无雨滴打击时薄层水流的泥沙含沙量变化相反。雨滴击溅作用下,薄层水流的扰动系数随水流深度的增大呈线性减小;对侵蚀性黄土而言,在直径 2.68 mm 雨滴击溅作用下,无扰动水深为 6.94 mm;在直径 3.02 mm 雨滴击溅作用下,无扰动水深为 7.20 mm。考虑到雨滴击溅主要影响因子、雨滴特征和土壤性质,提出基于缓坡的扰动系数预测方程: $C_r = 0.6565 S I^{0.0728} (h_0 - h)$,该方程适用于黄土高原缓坡坡面薄层水流击溅扰动作用的预测。

[参考文献]

- [1] Ellison W D. Soil erosion studies [J]. Agric Eng, 1947, 28(4): 145-146.
- [2] 吴普特,周陪华. 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): 40-42.
Wu P T, Zhou P H. The effect of raindrop splash on the sheet flow hydraulic friction factor [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 8(2): 40-42. (in Chinese)
- [3] 吴普特. 动力水蚀实验研究 [M]. 陕西: 科学技术出版社, 1997: 9.
Wu P T. Experimental study on soil erosion dynamic mechanism [M]. Xi'an: Shaanxi Science Press, 1997: 9. (in Chinese)
- [4] 张光辉. 坡面薄层流水动力学特征的实验研究 [J]. 水科学进展, 2002, 13(2): 159-165
Zhang G H. Study on hydraulic properties of shallow flow [J]. Advance in Water Science, 2002, 13(2): 159-165. (in Chinese)
- [5] Dunne T, Zhang W, Aubry B. Effects of rainfall, vegetation, and microtopography on infiltration and runoff [J]. Water Resources Research, 1991, 27(9): 2271-2285.
- [6] 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.
- [7] Kinnel P I A. The influence of flow discharge on sediment concentrations in raindrop induced flow transport [J]. Aust J Soil Sci, 1988, 26: 575-582.
- [8] Kinnel P I A. The mechanics of raindrop-reduced flow transport [J]. Aust J Soil Sci, 1990, 28: 497-516.
- [9] Kinnel P I A. The effect of flow depth on sediment transport induced by raindrops impacting shallow overland flow [J]. Am Soc Agric Eng, 1991, 34(1): 161-168.
- [10] Kinnel P I A. Sediment concentration resulting from flow depth/drop size interactions in shallow overland flow [J]. Trans ASAE, 1993, 36: 1099-1103.
- [11] Kinnel P I A. Sediment transport by shallow flows impacted by pulsed artificial rainfall [J]. Aust J Soil Sci, 1993, 31: 199-207.
- [12] 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.
- [13] Parsons A J, Gadian A M. Uncertainty in modeling the detachment of soil by rainfall [J]. Earth Surf Processes Landforms, 2000, 25: 723-728.
- [14] Salles C, Poeson J, Govers G. Statistical and physical analysis of soil detachment by rainfall impact: rain erosivity indices and threshold energy [J]. Water Resources Research 2000, 36(9): 2721-2729.
- [15] Zhang X C, Nearing M A, Miller W P, et al. Modeling interrill sediment delivery [J]. Soil Sci Soc Am J, 1998, 64: 438-444.
- [16] Gabet E J, Dunne T. Sediment detachment by rain power [J]. Water Resources Research, 2003, 39(1): 1002-1014.
- [17] 胡世雄, 靳长兴. 坡面流与坡面侵蚀力过程研究的最新进展 [J]. 地理研究, 1998, 17(3): 326-335.
Hu S X, Jin C X. The recent development of the study on overland flow and hillslope processes [J]. Geographical Research, 1998, 17(3): 326-335. (in Chinese)
- [18] 王秀英, 曹文洪. 坡面土壤侵蚀产沙机理及数学模拟研究综述 [J]. 水土保持学报, 1999, 5(3): 87-92.
Wang X Y, Cao W H. Summarization about mechanism and mathematics simulation of soil erosion and sediment yield on slope surface [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1999, 5(3): 87-92. (in Chinese)
- [19] 刘秉正, 吴发启. 土壤侵蚀 [M]. 陕西: 陕西人民出版社, 1997: 34-35.
Liu B Z, Wu F Q. Soil erosion [M]. Xi'an: Shaanxi People Press, 1997: 34-35. (in Chinese)
- [20] 中华人民共和国水利电力部. 水土保持试验规范 [M]. 北京: 中国水利出版社, 1991.
Ministry of water resources and electric power in P R China. Experimental standard of soil and water conservation [M]. Beijing: Chinese Water and Electricity Press, 1991. (in Chinese)
- [21] Gunn R, Kinzer G D. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air [J]. J Meteorol, 1949, 6: 243-248.
- [22] Laws J O, Parsons D A. The relation of raindrop size to intensity [J]. Eos Trans AGU, 1943, 24: 452-459.
- [23] 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.