

雨滴击溅与薄层水流混合侵蚀的输沙机理

郑腾辉^{1a}, 邢媛媛^{1b,2}, 何凯旋^{1b}, 滕飞^{1b}, 李光录^{1a,1b}

(1 西北农林科技大学 a 水土保持研究所, b 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011)

[摘要] 【目的】针对雨滴击溅与薄层水流混合侵蚀过程输沙机理研究中存在的问题, 研究雨滴击溅对坡面径流输沙的影响。【方法】采用室内人工模拟降雨试验, 以娄土、黄绵土和黑垆土为供试土壤, 在不同雨滴直径(直径 2.22, 2.68 和 3.04 mm)、不同坡度(0°, 2°和 4°)和薄层水流厚度(0, 2, 4 和 6 mm)条件下, 分析单雨滴击溅时, 泥沙溅蚀量与水层厚度的关系; 多雨滴击溅时, 泥沙溅蚀量与薄层水流厚度的关系, 分别对二者关系进行拟合; 同时, 对于多雨滴击溅时, 不同薄层水流厚度下黄绵土泥沙溅蚀量和雨滴动能的关系进行了分析。【结果】单雨滴击溅时, 泥沙溅蚀量随水层厚度的增加而减少, 且雨滴直径越大其扰动水层厚度越大, 当雨滴直径由 2.22 mm 增加到 3.04 mm 时, 平均扰动水层厚度由 10 mm 增加到 14.67 mm。多雨滴击溅时, 在相同的坡度(0°~4°), 不同土壤和雨滴直径下, 随薄层水流厚度的增加, 泥沙溅蚀量呈先升后降趋势; 当薄层水流厚度相同时, 随雨滴直径的增加, 泥沙溅蚀量呈增大趋势。当雨滴动能不变时, 泥沙溅蚀量随着薄层水流厚度的增加而增大; 当薄层水流厚度一定时, 泥沙溅蚀量随雨滴动能的增加而增大。【结论】建立了单雨滴击溅和多雨滴击溅条件下扰动水层厚度与泥沙溅蚀量的关系式。

[关键词] 模拟降雨; 薄层水流; 混合侵蚀; 雨滴动能; 雨滴击溅; 输沙机理

[中图分类号] S157.1

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2016)03-0211-08

Rain splash and sheet flow mixed sediment transport mechanism

ZHENG Teng-hui^{1a}, XING Yuan-yuan^{1b,2}, HE Kai-xuan^{1b},
TENG Fei^{1b}, LI Guang-lu^{1a,1b}

(1 a Institute of Soil and Water Conservation, b College of Natural Resources and Environment,
Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Xinjiang Institute of Ecology and Geography,
Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: 【Objective】Effect of raindrop splash on slope runoff and sediment transport was studied in this paper. 【Method】In the indoor artificial rainfall simulation, different slopes (0°, 2° and 4°), different sheet flow thicknesses (0, 2, 4 and 6 mm) and different raindrop diameters (2.22, 2.68 and 3.04 mm) were tested. The relationships between sediment splash erosion amount and the deep layer of water for single raindrop splashing and between sediment splash erosion amount and sheet flow thickness for multiple raindrop splashing were analyzed and fitted. The relationship of sediment splash erosion amount of yellow soil and raindrop kinetic energy under different sheet flow thicknesses was also analyzed. 【Result】For single raindrop splashing, splash amount decreased with the increase of sheet flow thickness, raindrop diameter increased with the increased of disturbance layer thickness, and the average thickness of water resisting disturbance increased from 10 to 14.67 mm when raindrop diameter increased from 2.22 to 3.04 mm. For

[收稿日期] 2014-07-08

[基金项目] 国家级大学生创新创业训练计划项目(1210712061)

[作者简介] 郑腾辉(1990—), 男, 河南商丘人, 在读硕士, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 1364162509@qq.com

[通信作者] 李光录(1964—), 男, 甘肃永靖人, 副教授, 博士, 主要从事水土保持与土地利用研究。

E-mail: guangluli@nwsuaf.edu.cn

multiple raindrop splashing, sediment splash erosion amount augmented firstly then decreased as the increased of sheet flow thickness. With same thickness, sediment splash erosion amount increased with the increase of raindrop diameter. When raindrop kinetic energy remained same, sediment splash erosion amount reduced with the increase of shallow flow thickness. When thickness did not change, sediment splash erosion amount increased with the increase of raindrop kinetic energy. 【Conclusion】 This study established the relationships between single raindrop splash amount and sediment layer thickness as well as between sediment splash erosion amount and multiple raindrops splash amount.

Key words: artificial precipitation; shallow flow; mixed erosion; rain kinetic energy; raindrop splash; sediment transport mechanism

雨滴溅蚀是以雨滴打击为主要动力,打击地表引起土壤分散、跃移的一种侵蚀方式^[1]。薄层径流则是通过对土壤分散、悬浮和搬运而形成侵蚀^[2]。雨滴击溅与薄层径流混合作用于某一坡面时,其侵蚀过程更为复杂,且侵蚀强度明显增加。雨滴侵蚀量一般占总侵蚀量的 70% 以上,薄层水流侵蚀所产生的泥沙绝大部分是由雨滴击溅所致^[3]。雨滴从空中垂直下落,对坡面上的泥沙产生 2 种作用,一种在垂直坡面方向,雨滴对泥沙颗粒产生向下的打击作用,使坡面泥沙更加密实,更难于起动;另一种沿坡面水流方向,雨滴对坡面泥沙颗粒产生分散作用,使坡面泥沙松动,易于起动^[4]。黄土坡面土壤侵蚀发生发展过程包括细沟间侵蚀过程、细沟侵蚀过程和浅沟侵蚀过程,三者的发生发展及其在坡面侵蚀产沙中的作用是目前坡面侵蚀机制研究的核心内容,也是坡面侵蚀预报模型所考虑的关键所在^[5]。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影响^[6-11]。坡面薄层水流并不是简单的遵循雷诺规律,它应该既不是层流,也不是充分紊流,而是一种介于它们之间的特殊流动^[12]。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^[6-8]。Kinne^[13-17] 对非黏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^[18] 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样侵蚀的主要营力,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^[19-20]。为此,本研究采用人工模拟降雨试验方法,选用 3 种不同类型的土壤,测定了单雨滴击溅时不同雨滴直径与水层厚度条件下不同土壤类型的泥沙溅蚀量,以及多雨滴击溅时不同雨滴直径与薄层水流厚度条件下不同土壤

类型的泥沙溅蚀量和不同雨滴动能与薄层水流厚度下黄绵土的泥沙溅蚀量,以期为揭示不同条件下雨滴击溅与薄层水流混合侵蚀的过程及其机理提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

1.1.1 雨滴发生装置 雨滴发生装置如图 1-a 所示,其整体为长方形的槽形装置,上部开口,长 70 cm,宽 20 cm,高 25 cm。其左边是一个进水装置,试验时运用虹吸原理向长槽里注水,降雨时可通过调节进水管高度来控制水槽中的水头高度;在长槽底部按 1 cm 等间距设置直径 1 cm 的圆孔,圆孔用橡胶塞封闭,每个橡胶塞可插一个针头。通过不同针号以产生不同直径的单雨滴和多雨滴。为防止在试验过程中,水中杂质使针头堵塞,故而选用纯净水。装置设计完成后,通过测定降雨器各个部位的雨强来检验雨滴发生装置的稳定性。

1.1.2 单雨滴击溅装置 单雨滴击溅试验装置如图 1-b 所示,采用直径为 10 cm、高 1.5 cm 的蒸发皿。

1.1.3 多雨滴径流收集装置 多雨滴径流收集装置如图 1-c 所示,该装置是一个长 90 cm、宽 15 cm、高 15 cm、上开口的长方体,水槽前方进水口用量程较小的压力表调节进水流量,以便控制水槽前段水箱中的水头高度;缓流多孔板主要起到保持水流稳定性的作用;在水槽前后两处各装 1 个探针,用于测定薄层厚度;在土槽底部装有直径 1 cm 的土样饱和供水管,以便使供试土样能够缓慢饱和。整个装置采用单循环系统,由水泵、阀门、压力表、进水箱、探针和饱和管组成。

1.2 土样的采集及装填

试验使用土壤为陕西杨凌的娄土、延安的黄绵土和志丹县的黑垆土,各土样理化性状见表 1。供

试土样采集后进行风干,去除植物枯落物、根系,过筛。单雨滴试验装填 3 mm 厚过筛(1 mm 筛孔)后的土样,向蒸发皿中缓慢加水待土样饱和;多雨滴试验前先在试验槽底均匀铺设 5 cm 厚的河沙(过 5 mm 筛孔),再装填厚度为 5 cm、体积为 4 500 cm³

过筛(2.5 mm 筛孔)后的土样。装填结束后,用特制平尺将表面刮平,打开土样饱和供水管,缓慢供水,使土样饱和 6 h,保证试验过程中无下渗水流出现。

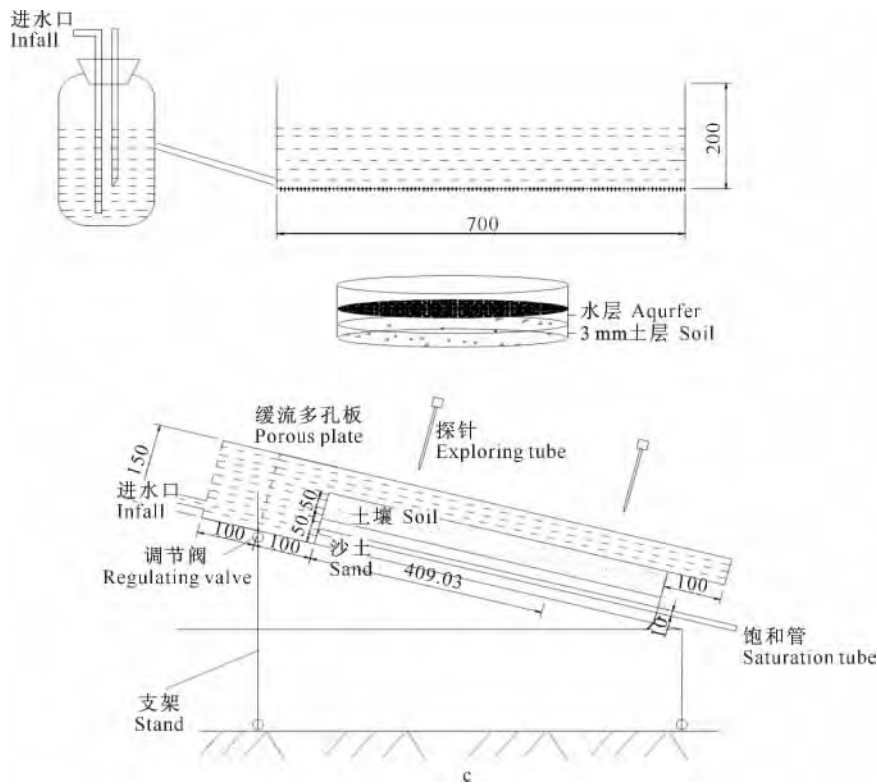


图 1 雨滴发生器试验装置示意图(单位:mm)

a. 雨滴发生装置;b. 单雨滴击溅装置;c. 多雨滴径流收集装置

Fig. 1 Schematic design of the rainfall device (unit:mm)

a. The rainfall device;b. Single raindrop splash device;c. Multiple raindrops runoff collecting device

表 1 供试土样的主要理化性状

Table 1 Characteristics of soils used in the experiments

土类 Soil	母质 Matter	有机质/ (g · kg ⁻¹) Organic carbon	全氮/ (g · kg ⁻¹) Total nitrogen	全磷/ (g · kg ⁻¹) Total phosphorus	颗粒组成/% Particle composing				
					<2 μm	≥2~ <10 μm	≥10~ <50 μm	≥50~ <100 μm	≥100 μm
黄绵土 Huangmian soil	黄土 Loess	27.01±13.89	1.14±0.6	1.21±0.66	5.9	49.1	24.7	12.2	8.1
楼土 Lou soil	黄土 Loess	14.6	1.04	0.62	3.1	28.7	51.1	7.9	9.2
黑垆土 Heilu soil	沙黄土 Sandy Loess	7.5±2.5	0.065±0.035	0.16±0.01	11.1	50.7	21.3	10.4	6.5

1.3 试验方法

1.3.1 单雨滴击溅试验 单雨滴击溅试验时,需将图 1-a 装置放置一定高度 h(h 可根据实际降雨时雨滴终点速度算出),不同的针头号根据试验需要安插好,左边进水管高度根据试验需要调节。因为是单雨滴试验所以只插入 1 个针头。

针头雨滴直径采用单雨滴法测定,因为一滴雨

滴从高处落下极易受到风力的影响,因此要尽量减少风对试验的影响,试验时用 PVC 管是为了使风力对雨滴的影响降到最低。取试验针头,将雨滴通过竖直的 PVC 管从 6.8 m 的高处降落,使雨滴尽量滴在蒸发皿的圆心处,记录滴数后,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

试验设 3 个不同水头高度,每一高度重复测定 5 次,结果取平均值,分别用 5、6、7、9、12、16 号针头重复试验,共测 90 组数据,选出雨滴直径相差基本为 0.4 mm 的 5#、7#、9# 针头数据,结果如表 2 所示。

将饱和后土样保持一定厚度的水层,根据选定的针头进行试验,试验水层厚度分别为 3、5、7、10 cm。然后换针头换土样重复上述试验,测定泥沙溅蚀量,每组试验重复 3 次,试验共 108 组。

1.3.2 多雨滴试验 多雨滴人工降雨的降雨强度采用直接法测定。对每一针号在水槽底部插 264 个针头,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 5 次,取平均值即为该针号降雨强度。试验共 15 组,最终选取 0.057,0.228,0.724 mm/min 雨强进行试验。

表 2 人工模拟降雨雨滴的主要参数

Table 2 Main raindrop parameters for artificial simulated rainfall

针头号 Pin number	雨滴直径/mm Raindrop diameter	下降高度/m Descent height	降雨强度/ (mm·min ⁻¹) Rainfall intensity	终点速度/ (m·s ⁻¹) Terminal velocity	雨滴动能/(×10 ⁻³ J) Rainfall kinetic energy
5	2.22	6.8	0.057	7.22	68.16
7	2.68	6.8	0.228	7.73	78.17
9	3.04	6.8	0.724	8.52	94.97

1.3.3 薄层水流的模拟 如图 1-c 所示的多雨滴径流收集装置,在其进水口上侧放置 1 个压力表,在压力表 2 侧各设置 1 个调节阀,以调节进水量大小,进而调节储水量高度以控制薄层水流厚度。在试验前,利用水槽后部饱和管进水口缓慢进水,先浸透水槽内沙土及试验土样,让坡面土样入渗饱和,以便试验中薄层水流厚度均匀光滑。水槽通过下部支架调节到试验所需要的坡度(试验坡度分别为 0°,2°,4°)。

1.4 试验步骤

试验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 3 次,取平均值即可得流量和坡度水深,然后每间隔 1 min 取该水流下泥沙,经沉淀、分离、烘干并称质量,获得水沙量,重复 5 次。每个测次均需更换表层供试土样,试验采用坡度分别为 0°,2°和 4°,雨强分别为 0,0.055 7,0.228 和 0.724 mm/min,水深为 0,2,4,6 mm。一个土样试验完成后换另一种土样重复上述试验,3 个土样测完后再换另一号针头重复试验。每组重复 3 次,共进行 144 组试验。泥沙收集按《水土保持试验规范》^[22]进行,试验过程中均无细沟形成。

雨滴下降过程中在竖直方向受重力和空气阻力的作用,水平方向受到气流的作用。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^[21],当雨滴直径 $d > 1.9$ mm 时,其终点速度为:

$$v = (17.2 - 0.844d)\sqrt{0.1d} \quad (1)$$

式中: v 为终点速度,m/s; d 为雨滴直径,mm。

根据李光录^[19]降雨能计算公式,单位面积产生的雨滴动能为:

$$E_{\text{rain},A} = \frac{\rho I t v^2 \cos \theta}{2} \quad (2)$$

式中: A 为降雨面积,m²; ρ 为水的密度,1×10³ kg/m³; I 为一场降雨的雨强,m/s; t 为降雨历时,s; θ 为地表坡度,°。

人工降雨雨滴的主要参数如表 2 所示。

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,泥沙的输移过程便从此开始。进入水流的土样颗粒上升到一定高度后,便会下落到坡面,在土粒上升和下落的交替过程中,流动水流对土样颗粒进行搬运。一旦溅起土粒下落到下游坡面,再一次的启动将决定于下一个雨滴的击溅扰动作用。

2.1 单雨滴击溅时泥沙溅蚀量与水层厚度的关系

图 2 显示了单雨滴击溅时,黑垆土、黄绵土、塬土在雨滴直径分别为 2.22,2.68,3.04 mm 时,随着水层厚度的增加泥沙溅蚀量的变化。由图 2-a 可知,在雨滴直径为 2.22 mm 时,随水层厚度的增加,黑垆土泥沙溅蚀量由 0.018 g/(cm²·min)减小为 0 g/(cm²·min),黄绵土由 0.013 g/(cm²·min)减小为 0 g/(cm²·min),塬土由 0.006 g/(cm²·min)减小为 0 g/(cm²·min);在水层厚度为 7 mm 时,黑垆土、黄绵土、塬土泥沙溅蚀量分别为 0.05,0.04 和 0.012 g/(cm²·min),说明雨滴直径为 2.22 mm 时扰动最大水层厚度是介于 7 和 10 mm 之间的。由图 2-b 可知,在雨滴直径为 2.68 mm 时,黑垆土泥沙溅蚀量由 0.032 g/(cm²·min)减小为 0.005

g/(cm²·min),黄绵土由 0.021 g/(cm²·min)减小为 0.005 g/(cm²·min), 塬土由 0.009 g/(cm²·min)减小为 0.002 g/(cm²·min),说明扰动最大水层厚度大于 10 mm。由图 2-c 可知,在雨滴直径为 3.04 mm 时,黑垆土泥沙溅蚀量由 0.032 g/(cm²·min)减小为 0.006 g/(cm²·min),黄绵土由 0.040 g/(cm²·min)减小为 0.016 g/(cm²·min),塬土由 0.009 g/(cm²·min)减小为 0.002 g/(cm²·min),说明扰动最大水层厚度大于 10 mm。当雨滴

直径由 2.22 mm 增加到 3.04 mm 时,平均扰动水层厚度由 10 mm 增加到 14.67 mm。从趋势上可以看出,随着水层厚度的增加,泥沙溅蚀量呈减少趋势。运用 SPSS 21.0 软件对单雨滴泥沙溅蚀量和水层厚度进行拟合,发现二者呈现对数函数关系:

$$q = a \ln h + b. \quad (3)$$

式中:q 为单雨滴泥沙溅蚀量,g/(cm²·min);h 为水层厚度,mm;a,b 为经验系数。

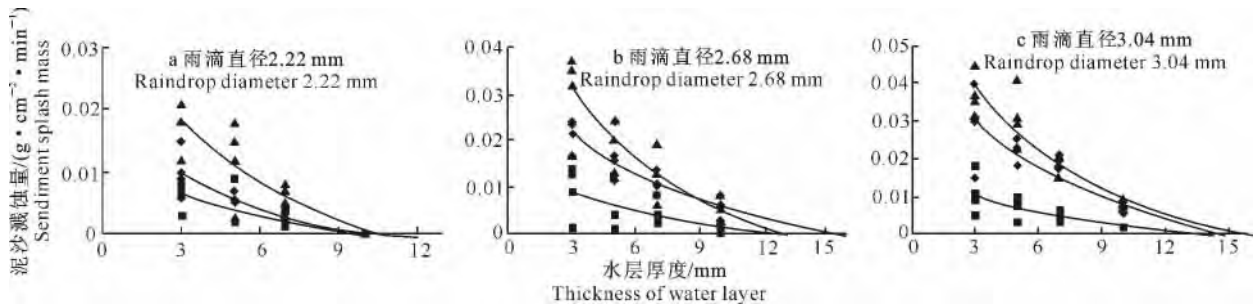


图 2 单雨滴击溅时泥沙溅蚀量与水层厚度的关系

▲. 黑垆土;◆. 黄绵土;■. 塬土

Fig. 2 Relationship between single raindrop sediment splash mass and thickness of water layer

▲. Heilu soil;◆. Huangmian soil;■. Lou soil

单雨滴击溅时泥沙溅蚀量与水层厚度的拟合关系系数见表 3。

表 3 单雨滴击溅时泥沙溅蚀量与水层厚度的拟合系数

Table 3 Relationship between single raindrop sediment splash mass and thickness of water layer coefficient

土样类型 Soil	样本数(n) Number of samples	雨滴直径/mm Raindrop diameter	a	b	相关系数 Correlation coefficient
黑垆土 Heilu soil	12	2.22	-0.015	0.035	0.985
		2.68	-0.022	0.056	0.998
		3.04	-0.025	0.067	0.946
黄绵土 Huangmian soil	12	2.22	-0.008	0.019	0.995
		2.68	-0.014	0.037	0.970
		3.04	-0.019	0.051	0.899
塬土 Lou soil	12	2.22	-0.005	0.012	0.928
		2.68	-0.007	0.017	0.993
		3.04	-0.007	0.019	0.992

由表 3 可知,拟合相关系数均大于 0.899,所以相关性很高。运用拟合公式,计算直径 2.68 和

3.04 mm 雨滴击溅下,泥沙溅蚀量为 0 时的最大扰动水层厚度,结果如表 4 所示。

表 4 单雨滴击溅时泥沙溅蚀量为 0 时的水层厚度

Table 4 Flow depth with 0 splash mass under single raindrop splash

雨滴直径/mm Raindrop diameter	水层厚度/mm Shallow flow depth		
	黑垆土 Heilu soil	黄绵土 Huangmian soil	塬土 Lou soil
2.68	12.749	13.053	14.343
3.04	14.585	14.647	15.094

由图 2 可知,直径 2.22 mm 的雨滴最大扰动水层厚度为 7~10 mm,当雨滴直径为 2.68 和 3.04 mm 时,其最大扰动水层厚度均大于 10 mm。根据拟合的单雨滴泥沙溅蚀量与水层厚度函数关系

计算结果(表 4)可知,雨滴直径为 2.68 mm 时,黑垆土、黄绵土、塬土的最大扰动水层厚度分别为 12.749,13.053 和 14.343 mm;雨滴直径为 3.04 mm 时,黑垆土、黄绵土、塬土的最大扰动水层厚度

分别为 14.585, 14.647 和 15.094 mm。

2.2 多雨滴击溅时泥沙溅蚀量与薄层水流厚度的关系

图 3 显示, 坡度为 0° 条件下, 楼土、黄绵土、黑垆土在雨滴直径为 2.22, 2.68, 3.04 mm 时泥沙溅蚀量随薄层水流厚度的增加而变化。楼土在 0° 坡面上, 当雨滴直径为 3.04 mm, 薄层水流厚度从 0 增加到 6 mm, 降雨侵蚀扰动所产生的泥沙溅蚀量由 $0.29 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 增加至 $21.65 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 又减小至 $7.03 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$; 当雨滴直径为 2.68 mm, 薄层水流厚度从 0 增加到 6 mm, 泥沙溅蚀量

由 $0.36 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 增加至 $13.04 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 又减小至 $3.60 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$; 当雨滴直径为 2.22 mm 时, 薄层水流厚度从 0 增加到 6 mm, 泥沙溅蚀量由 $0.37 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 增加至 $7.36 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 又减小至 $1.98 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 。在不同雨滴直径下, 黄绵土、黑垆土的溅蚀量变化趋势与楼土相同。说明在无薄层水流时, 泥沙主要由击溅产生, 且产生泥沙量较小, 随薄层水流厚度的增大, 雨滴击溅对土样的侵蚀作用逐渐减小, 泥沙主要由薄层水流的冲刷作用产生。

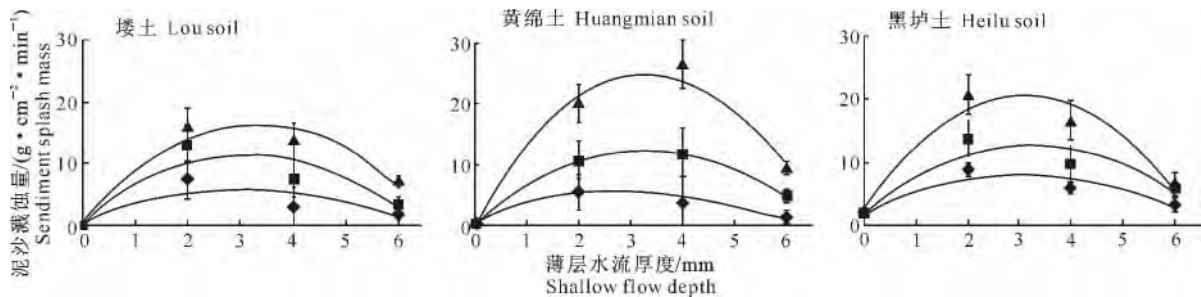


图 3 0° 坡面上不同雨滴直径下泥沙溅蚀量与薄层水流厚度的关系

◆. 雨滴直径 2.22 mm; ■. 雨滴直径 2.68 mm; ▲. 雨滴直径 3.04 mm

Fig. 3 Relationship between sediment splash mass and shallow flow depth with different raindrop diameters at gradient 0°

◆. Raindrop diameter 2.22 mm; ■. Raindrop diameter 2.68 mm; ▲. Raindrop diameter 3.04 mm

根据上述分析, 采用回归模型对 0° 坡面上不同雨滴直径下的泥沙溅蚀量与薄层水流厚度的关系进行拟合, 得到多元回归方程为:

$$Q_s = ah'^2 + bh' + c. \quad (4)$$

式中: Q_s 为多雨滴泥沙溅蚀量, $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$; h' 为薄层水流厚度, mm; a 、 b 为经验系数; c 为经验常数。

0° 坡面上泥沙溅蚀量与薄层水流厚度的拟合关系系数见表 5。

表 5 0° 坡面上泥沙溅蚀量与薄层水流厚度的拟合系数

Table 5 Relationship between splash mass and shallow flow depth coefficient at gradient 0°

土样类型 Soil	样本数(n) Number of samples	雨滴直径/mm Raindrop diameter	a	b	c	相关系数 Correlation coefficient
黑垆土 Heilu soil	12	2.22	-0.623	3.888	1.865	0.882
		2.68	-1.026	6.679	1.945	0.841
		3.04	-1.809	11.415	2.311	0.947
黄绵土 Huangmian soil	12	2.22	-0.494	3.073	0.467	0.915
		2.68	-1.134	7.582	0.063	0.999
		3.04	-2.320	15.644	0.472	0.988
楼土 Lou soil	12	2.22	-0.519	3.185	0.795	0.901
		2.68	-1.062	6.642	1.006	0.886
		3.04	-1.767	11.255	1.574	0.814

图 4 显示, 2° 坡面上, 楼土、黄绵土、黑垆土在雨滴直径分别为 2.22, 2.68, 3.04 mm 时泥沙溅蚀量随薄层水流厚度的增加其变化趋势与坡度为 0° 时相同, 说明坡度因子对泥沙的产生有重要影响, 其泥沙溅蚀量也可以用方程(2)表示。鉴于 4° 坡面上, 楼土、黄绵土、黑垆土在雨滴直径分别为 2.22, 2.68, 3.04 mm 时泥沙溅蚀量随薄层水流厚度的增加的

变化趋势与坡度为 0° 和 2° 时相同, 故在此未列出试验结果。

2.3 多雨滴击溅时泥沙溅蚀量与雨滴动能的关系

鉴于多雨滴击溅时黄绵土、楼土、黑垆土泥沙溅蚀量与雨滴动能关系的变化一致, 故本研究仅对黄绵土在不同薄层水流厚度下泥沙溅蚀量与雨滴动能关系进行分析, 结果见图 5。

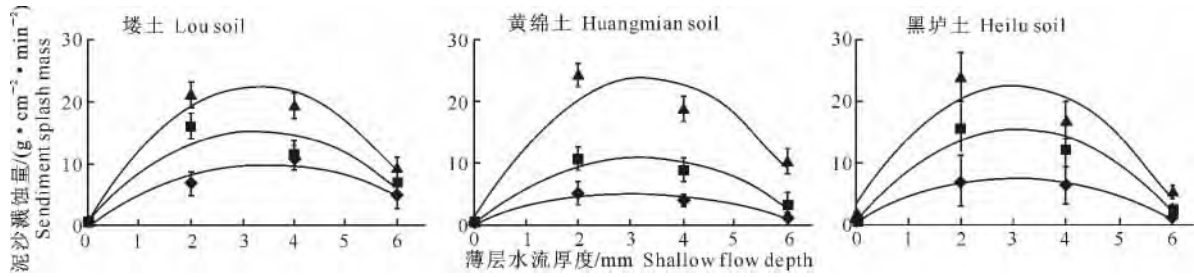


图 4 2°坡面上不同雨滴直径下泥沙溅蚀量与薄层水流厚度的关系

◆.雨滴直径 2.22 mm;■.雨滴直径 2.68 mm;▲.雨滴直径 3.04 mm

Fig. 4 Relationship between sediment splash mass and shallow flow depth with different raindrop diameters at gradient 2

◆. Raindrop diameter 2.22 mm;■. Raindrop diameter 2.68 mm;▲. Raindrop diameter 3.04 mm

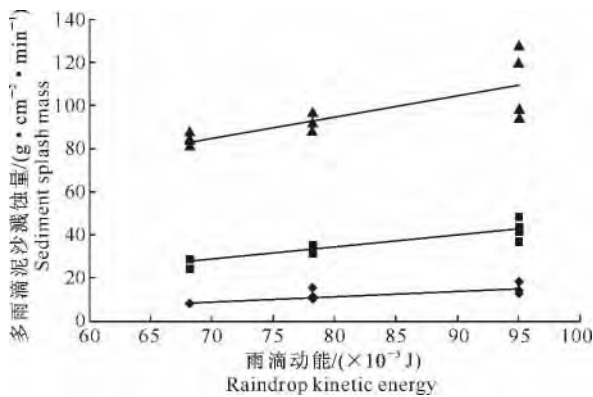


图 5 不同薄层水流厚度下黄绵土泥沙溅蚀量与雨滴动能的关系

◆.无薄层水流;■.2 mm 薄层水流;▲.4 mm 薄层水流

Fig. 5 Relationship between sediment splash mass and raindrop kinetic energy with different shallow flow depths of Huangmian soil

◆.Shallow flow depth of 0 mm;■.Shallow flow depth of 2 mm;▲.Shallow flow depth of 4 mm

图 5 显示,当雨滴动能由 $68.18 \times 10^{-3} \text{ J}$ 增加到 $94.97 \times 10^{-3} \text{ J}$ 时,0 mm 薄层水流下泥沙溅蚀量由 $8.23 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 增加到 $14.73 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$,2 mm 薄层水流下由 $27.72 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 增加到 $42.35 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$,4 mm 薄层水流下由 $84.07 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 增加到 $104.68 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 。运用 SPSS 21.0 软件对不同薄层水流条件下的泥沙溅蚀量与雨滴动能的关系进行拟合,发现二者呈幂函数关系,可用以下方程表示:

$$Q_s = ae^{E_s \times b} \quad (5)$$

式中: Q_s 为多雨滴泥沙溅蚀量, $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$; E_s 为雨滴动能, $\times 10^{-3} \text{ J}$; a 、 b 为经验系数。

黄绵土在不同薄层水流厚度下泥沙溅蚀量与雨滴动能的拟合关系系数见表 6。由图 5 及表 6 可知,对黄绵土而言,当薄层水流厚度一定时,泥沙溅蚀量随雨滴动能的增加而增大。雨滴动能由

$68.16 \times 10^{-3} \text{ J}$ 增加到 $94.97 \times 10^{-3} \text{ J}$,在无薄层水流时泥沙溅蚀量由 $8.23 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 增加到 $17.42 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$,且薄层水流厚度越高泥沙溅蚀量增加越多。这是由于薄层水流的冲刷是泥沙产生的主要动力,雨滴击溅扰动薄层水流进而增加泥沙冲刷能力,当雨滴动能增加时其扰动能力越强,因此泥沙溅蚀量增加越多。

表 6 黄绵土在不同薄层水流厚度下泥沙溅蚀量与雨滴动能的拟合系数 ($n=12$)

Table 6 Relationship between sediment splash mass and raindrop kinetic energy with different shallow flow depths of Huangmian soil ($n=12$)

薄层水流厚度/mm Shallow flow depth	a	b	相关系数 Correlation coefficient
0	46.230	0.008	0.999
2	9.596	0.015	0.997
4	2.001	0.021	0.975

3 结 论

1)单雨滴击溅时,泥沙溅蚀量(q)随水层厚度(h)的增加而增大,雨滴直径越大则扰动水层厚度越大,其关系可用对数函数关系式 $q = a \ln h + b$ 表示,当雨滴直径为 2.22 mm 时扰动最大水层厚度为 7~10 mm;当雨滴直径为 2.68 和 3.04 mm 时,其扰动最大水层厚度均大于 10 mm。根据拟合函数计算可得,直径 2.68 mm 雨滴扰动的黑垆土、黄绵土、娄土的最大水层厚度分别为 12.749,13.053,14.343 mm;3.04 mm 雨滴扰动的黑垆土、黄绵土、娄土的最大水层厚度分别为 14.585,14.647,15.094 mm。

2)坡度相同时,不同土壤(黄绵土、娄土、黑垆土)及不同雨滴直径(2.22,2.68,3.04 mm)条件下,当薄层水流厚度(h')从 0 增加到 6 mm 时,其与降雨击溅混合侵蚀下泥沙溅蚀量(Q_s)曲线总体呈先上升后下降的趋势,其关系可用二次抛物线方程 $Q_s =$

$ah'^2 + bh' + c$ 表示。

3) 薄层水流厚度一定时, 泥沙溅蚀量(Q_s)随雨滴动能(E_s)的增加而增大, E_s 由 68.16×10^{-3} J 增加到 94.97×10^{-3} J 时, 无薄层水流的泥沙溅蚀量由 $8.23 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 增加到 $17.42 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$, 且薄层水流厚度越高泥沙溅蚀量增加越多, 其关系可用幂函数 $Q_s = ae^{E_s \times b}$ 表示。这是由于薄层水流的冲刷是泥沙产生的主要动力, 雨滴击溅扰动薄层水流进而增加泥沙冲刷能力, 当雨滴动能增加时其扰动能力越强, 因此泥沙溅蚀量增加越多。

[参考文献]

- [1] 吴普特, 周佩华. 地表坡度对雨滴溅蚀的影响 [J]. 水土保持通报, 1991, 11(3): 8-13.
Wu P T, Zhou P H. The effect of land slope upon raindrop splash erosion [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1991, 11(3): 8-13. (in Chinese)
- [2] 张洪江. 土壤侵蚀原理 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2000.
Zhang H J. Principle of soil erosion [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2000. (in Chinese)
- [3] 吴普特, 周佩华. 雨滴击溅在薄层水流侵蚀中的作用 [J]. 水土保持通报, 1992, 12(4): 19-26, 47.
Wu P T, Zhou P H. The effect of rain drop splash on the sheet flow hydraulic friction factor [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 12(4): 19-26, 47. (in Chinese)
- [4] 赵春红, 高建恩, 王宏杰, 等. 降雨对坡面薄层水流泥沙起动的的影响 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2013(6): 1057-1069.
Zhao C H, Gao J E, Wang H J, et al. Effect of rainfall on sediment incipient motion of overland flow [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013(6): 1057-1069. (in Chinese)
- [5] 郑粉莉. 黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究 [J]. 土壤学报, 1998, 35(1): 95-103.
Zheng F L. Study on interrill erosion and rill erosion on slope farmland of Loess Area [J]. Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(1): 95-103. (in Chinese)
- [6] 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): 40-42.
Wu P T, Zhou P H. The effect of rain drop splash on the sheet flow hydraulic friction factor [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 8(2): 40-42. (in Chinese)
- [7] 吴普特. 动力水蚀实验研究 [M]. 西安: 科学技术出版社, 1997: 9.
Wu P T. Experimental study on soil erosion dynamic mechanism [M]. Xi'an: Science Press, 1997: 9. (in Chinese)
- [8] 张光辉. 坡面薄层水流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)
- [9] Jayawardena A W, Rezaur R B. Drop size distributions and kinetic energy load of rain storms in Hong Kong [J]. Hydrol Processes, 2004(14): 1069-1082.
- [10] Parsons A J, Gadian A M. Uncertainty in modeling the detachment of soil by rainfall [J]. Earth Surf Processes Landforms, 2000(25): 723-728.
- [11] Zhang X C, Nearing M A, Miller W P, et al. Modeling interrill sediment delivery [J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1998, 62(2): 438-444.
- [12] 闫美华. 雨滴击溅及薄层水径流动力对坡面侵蚀影响的研究 [J]. 中国农村水利水电, 2011(3): 66-69
Yan M H. Study on the effect of raindrops splash and runoff power of shallow flow on slope erosion [J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(3): 66-69. (in Chinese)
- [13] Kinnel P I A. Sediment consent ration resulting from flow depth/drop size interactions in shallow overland flow [J]. Trans ASAE, 1993(36): 1099-1103.
- [14] Kinnel P I A. Sediment transport by shallow flows impacted by pulsed artificial rainy all [J]. Aust J Soil Sci, 1993(31): 199-207.
- [15] Kinnel P I A. Sediment transport by medium to large tropism packing flows at sub terminal velocity [J]. Soil Sci Soc Am J, 2005(69): 902-905.
- [16] Kinnel P I A. The influence of flow discharge on sediment concentration s in raindrop induced flow transport [J]. Aust J Soil Sci, 1988(26): 575-582.
- [17] Kinnel P I A. The mechanics of raindrop-reduced flow transport [J]. Aust J Soil Sci, 1990(28): 497-516.
- [18] Gabet E J, Dunne T. Sediment detachment by rain power [J]. Water Resources Research, 2003, 39(1): 1002-1014.
- [19] 李光录, 吴发启, 庞小明, 等. 泥沙输移与坡面降雨和径流能量的关系 [J]. 水研究进展, 2008, 11(6): 868-874.
Li G L, Wu F Q, Pang X M, et al. Relationship between sediment transport with surface rainfall and runoff energies on sloping [J]. Advances in Water Science, 2008, 11(6): 868-874. (in Chinese)
- [20] 李光录, 吴发启, 赵小风, 等. 雨滴击溅下薄层水流的输沙机理研究 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(9): 149-154.
Li G L, Wu F Q, Zhao X F, et al. The mechanics of sediment transport under raindrops impacting shallow overland flow [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2009, 37(9): 149-154. (in Chinese)
- [21] 刘秉正, 吴发启. 土壤侵蚀 [M]. 西安: 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)
- [22] 中华人民共和国水利电力部. 水土保持试验规范 [M]. 北京: 中国水电出版社, 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)