

辽西低山丘陵区褐土和棕壤坡耕地溅蚀过程模拟

董亮¹, 吕刚¹, 傅昕阳², 杜昕鹏¹, 李叶鑫^{1,3}, 汤家喜¹

(1.辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2.广元城建投资集团有限公司, 四川 广元 628000; 3. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为揭示辽西低山丘陵区坡耕地典型土壤溅蚀特征, 选取褐土和棕壤作为研究对象, 采用人工模拟降雨试验对比研究2种土壤的溅蚀差异。结果表明: 褐土和棕壤不同方向溅蚀率、净溅蚀率和总溅蚀率差异较大。不同降雨强度下, 棕壤溅蚀率均随降雨历时呈现递减并趋于稳定的趋势; 褐土溅蚀率随降雨历时的变化可以划分为缓慢增长阶段、迅速增长阶段、快速下降阶段和相对稳定阶段。褐土的小粒级颗粒完成迁移的降雨历时临界值与不同方向溅蚀率、净溅蚀率和总溅蚀率的降雨历时临界值一致, 降雨历时为20~25 min; 棕壤的小粒级颗粒完成迁移的降雨历时临界值与不同方向溅蚀率、净溅蚀率和总溅蚀率的降雨历时临界值一致, 降雨历时为10~15 min。褐土向上坡溅蚀率、向下坡溅蚀率、净溅蚀率和总溅蚀率皆与降雨历时呈显著二次多项式关系, 而棕壤向上坡溅蚀率、向下坡溅蚀率、净溅蚀率和总溅蚀率皆与降雨历时呈显著对数关系。

关键词: 辽西低山丘陵区; 溅蚀率; 土壤侵蚀; 人工模拟降雨; 团聚体

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)01-0078-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2020.01.012

Simulation Study on Splash Erosion Process of Cinnamon Soil and Brown Soil Slope Farmland in Low Mountain and Hilly Region of Western Liaoning Province

DONG Liang¹, LÜ Gang¹, FU Xinyang², DU Xinpeng¹, LI Yexin^{1,3}, TANG Jiayi¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University,

Fuxin, Liaoning 123000; 2. Guangyuan City Construction Investment Group Co., Ltd., Guangyuan,

Sichuan 628000; 3. College of Mining Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000)

Abstract: In order to reveal the typical soil splash erosion characteristics of slope farmland in Low Mountain and Hilly Region of Western Liaoning Province, cinnamon soil and brown soil were selected as the research objects, and the differences of splash erosion between the two soils were studied by artificial simulated rainfall experiment. The results showed that there were great differences in splash erosion, net splash erosion and total splash erosion in different directions between cinnamon soil and brown soil. The splash erosion rate of brown soil decreased and tended to be stable with the increasing rainfall duration under different rainfall intensities; the changes of splash erosion rate of cinnamon soil with rainfall duration could be divided into four stages: slow growth stage, rapid growth stage, rapid decline stage and relative stably stage. The critical value of rainfall duration for completing migration of small particles in cinnamon soil and brown soil were 20 ~ 25 min and 10 ~ 15 min, respectively, which was consistent with the critical values of rainfall duration for splash erosion rate, net splash erosion rate and total splash erosion rate with different directions. The uphill splash erosion rate, downhill splash erosion rate, net splash erosion rate and total splash erosion rate of cinnamon soil were significantly quadratic polynomial relationship correlated with rainfall duration, while significantly logarithmic for brown soil.

Keywords: low mountain and hilly region of western Liaoning province; splash erosion rate; soil erosion; artificial simulated rainfall; aggregate

收稿日期: 2019-07-13

资助项目: 国家自然科学基金项目(41501548)

第一作者: 董亮(1993—), 男, 辽宁朝阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与生态修复研究。E-mail: 1594619889@qq.com

通信作者: 吕刚(1979—), 男, 吉林九台人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与土壤水文学的教学和研究。E-mail: lvgang2637@126.com

雨滴击溅侵蚀是指雨滴打击土壤表面,使土粒发生分散、分离、跃迁位移的过程^[1-2],是土壤侵蚀发生的最初过程^[3]。溅蚀会破坏土壤团聚体,堵塞土壤孔隙,降低土壤入渗能力,增加径流紊动性和径流输沙能力^[4-5]。雨滴打击引起土壤颗粒溅蚀的作用程度主要受到降雨特性^[6]、地表粗糙度^[7]、土壤特性^[8]、地面坡度^[9]等影响。周一杨等^[10]研究表明,不同开垦年限未开垦次生林地土壤的溅蚀量显著低于黑土耕地土壤;塔娜等^[11]研究表明,微地形水系分维能较好地反映复杂的微地形特征,而坡面耕作方式是溅蚀过程中微地形时空变异分布状况的控制性因子;马仁明等^[12]研究了不同土样在降雨溅蚀过程中溅蚀率的变化规律,揭示出团聚体稳定性越好,其破碎过程越缓慢,溅蚀率越小;肖海等^[13]研究表明,雨滴对土壤的溅蚀率均呈幂函数增加。

辽西(锦州、阜新、朝阳、葫芦岛)是辽宁省土壤侵蚀最严重的地区,土壤侵蚀面积达到全省侵蚀面积的49.3%^[14]。坡耕地作为辽西地区重要的耕地资源^[15],同时也是该区水土流失主要策源地^[16],其土壤侵蚀面积占到辽西地区土壤侵蚀面积的41.6%^[17]。辽西地区坡耕地土壤类型以褐土和棕壤为主,耕层土壤有机质含量偏低、结构性差、土壤抗蚀差^[18-19],是发生土壤侵蚀的主要土壤类型。褐土是碳酸盐弱度淋溶与聚集形成的土壤,土壤密实度较高,透水性较差,易形成地表径流,形成水土流失^[16]。棕壤是阔叶林下发生较强淋溶作用和黏化作用形成的土壤,渗透性强、涵蓄水源能力差^[20]。基于此,本文选取辽西低山丘陵区褐土和棕壤坡耕地为研究对象,通过人工模拟降雨系统研究降雨对坡耕地土壤溅蚀的影响,分析不同降雨强度、坡面不同方向下土壤溅蚀量及其空间分布特征,这将有利于深入理解溅蚀发生的过程和机理,以为辽西低山丘陵区坡耕地土壤侵蚀防治提供科学依据。

表 2 土壤团聚体结构分布特征								
土壤类型	处理 方式	各粒径团聚体含量/%						团聚体结构 破坏率/%
		>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm	
褐土	风干土团聚体	5.37	17.17	16.32	27.97	16.68	83.51	17.75
	水稳性团聚体	2.72	13.75	12.71	26.62	12.89	68.69	
棕壤	风干土团聚体	7.11	18.19	15.56	22.64	23.32	86.82	33.59
	水稳性团聚体	1.84	11.47	10.52	18.47	15.36	57.66	

1.2 人工模拟降雨器

试验采用的人工模拟降雨器为下喷式降雨系统,人工模拟降雨器具体参数详见参考文献[25]。本降雨器为有压喷头,雨滴终点速度在降雨高度达到2 m时就能达到与天然降雨雨滴终速分布范围相一致^[25-26],因此人工模拟降雨器可满足试验要求。参考

1 研究区概况

研究区位于辽宁省阜新蒙古族自治县(121°01′—122°26′E,41°44′—42°34′N),属辽西低山丘陵区,北温带大陆性半干旱季风气候,年均降水量511.4 mm,且多集中于7—8月,年均蒸发量1 790 mm,年均气温7.3℃,≥10℃年积温3 476℃,无霜期154 d,年均日照时间2 865.5 h,年均风速3 m/s。土壤类型以褐土、棕壤、草甸土、风沙土为主,其中褐土和棕壤是阜新地区主要土壤类型,面积大,分布广,面积占比达67.3%^[21]。植被属蒙古植物、长白植物系和华北植物区系交错地区,主要包括樟子松(*Pinus sylvestris* L. var. *mongholica* Litv.)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)、荆条(*Vitex negundo*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、兴安胡枝子(*Lespedeza davurica*)、多叶隐子草(*Cleistogenes polyphylla*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、大针茅(*Stipa grandis*)等。

1.1 试验样品采集

通过查阅《阜新市土地志》^[21]《阜新土壤》^[22]及项目组其他课题,结合现场实地调查,确定本研究试验地点。于2017年4月在阜新蒙古族自治县王府镇皂力营子村布设典型褐土坡耕地采样点,在阜新蒙古族自治县大板镇各力格村布设典型棕壤坡耕地采样点,采用“S”形布点取样,取样深度为0—20 cm。土样带回实验室风干后备用。土壤理化性质见表1,测定方法见文献[23]。采用沙维诺夫法^[24]测定土壤团聚体,测定结果见表2。

表 1 土壤理化性质					
土壤类型	容重/ (g·cm ⁻³)	有机质/ %	全氮/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
褐土	1.31	0.97	204.85	6.17	86.28
棕壤	1.42	1.02	200.37	5.86	88.53

研究区暴雨洪水设计方法^[27],本试验设计降雨强度为30,45,60,75 mm/h。试验时保证降雨强度相对误差控制在5%以内,降雨均匀度保证在85%以上。

1.3 溅蚀盘

为提高试验结果的准确性和可靠性,改进了Morgan 溅蚀盘^[28],具体参数见参考文献[25]。通过

溅蚀盘分析不同降雨条件下土壤溅蚀特征,以此获知溅蚀颗粒的分布状况。辽西地区 5°~15°坡耕地面积



1.4 样品收集与溅蚀量计算

试验控制土壤容重为 1.3 g/cm³,为保证溅蚀盘的透水性,将土样装入土盘前铺设 1 层纱布。在降雨结束后,采集收集盘上坡和下坡不同溅蚀距离土样,采用湿筛法测定溅蚀团聚体分布特征,然后测定烘干质量,计算总溅蚀量、上坡溅蚀量、下坡溅蚀量和净溅蚀量。本试验使用量程 3 kg、测量精度百分之一的电子天平,试验数据均保留到小数点后 2 位。计算公式^[10,29]为:

M = \frac{m}{w}

式中:M 为溅蚀量(g/cm);m 为溅蚀土壤颗粒质量(g);w 为环宽(cm)。

2 结果与分析

2.1 褐土和棕壤坡面不同方向溅蚀率动态变化过程对比

降雨强度是土壤溅蚀最重要的影响因素之一^[30]。由图 2 和图 3 可知,在不同雨强下褐土和棕

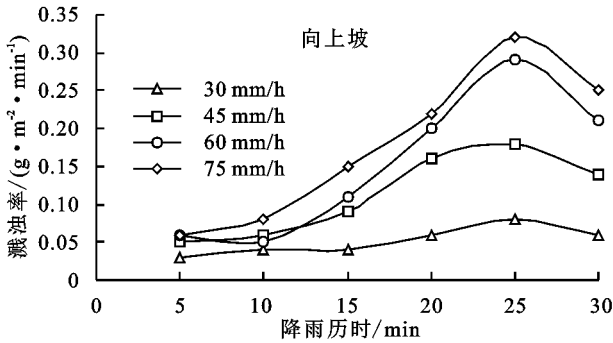


图 2 褐土坡面不同方向溅蚀率随降雨历时的变化过程

研究结果说明,雨滴打击作用对于褐土团聚体呈现一个连续的破坏过程,降雨初期的溅蚀率相对较低,随降雨历时的增加,土壤结构被破坏,搬运较多的松散物质。而棕壤溅蚀率在降雨初期很高,是因为棕壤土壤质地松散、渗透性强,土壤颗粒表层不容易

占坡耕地总面积的 80.4%^[16],本试验坡度选取为 10°。溅蚀盘见图 1。

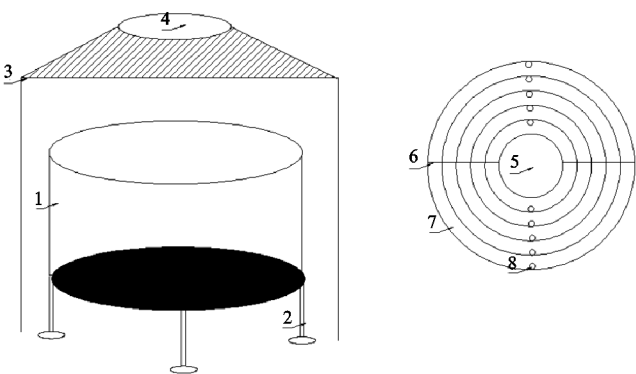
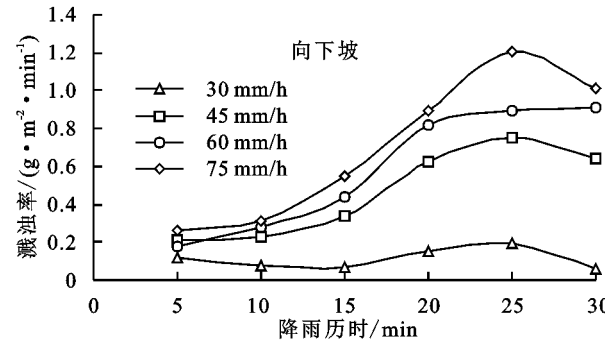


图 1 溅蚀盘

壤坡面向上坡、向下坡溅蚀率规律存在差异,在相同雨强下规律基本一致。褐土不同方向溅蚀率均随降雨历时呈现逐渐增加再快速下降最后趋于稳定的趋势,褐土不同方向溅蚀率在相同降雨历时下均表现为随雨强增大,溅蚀率增大,当降雨强度由 30 mm/h 增加至 75 mm/h 时,向上坡溅蚀率增加 1~3 倍,向下坡溅蚀率增加 1.17~5.37 倍。由此可知,在雨滴降落高度相同时,随着降雨强度的增大,雨滴的打击能力增强,能促使更多的土壤颗粒分离,胡伟等^[31]研究也得出雨强越大,土壤颗粒越容易被溅散。降雨强度为 75 mm/h 时向上坡、向下坡溅蚀率均最大,降雨强度 30 mm/h,不同方向溅蚀率在不同降雨历时下均为最大,向上坡溅蚀率增加 3.17~4.33 倍,向下坡溅蚀率增加 2.89~3.65 倍;棕壤不同方向溅蚀过程表现形式基本一致,即都随着降雨历时逐渐减小并趋于稳定,其中降雨强度 75 mm/h 时,棕壤向上坡溅蚀率降幅最大为 84%,降雨强度 60 mm/h 时,向下坡溅蚀率降幅最大为 73%。



形成薄层积水,在雨滴持续打击作用下容易搬运土壤表面分布的较多松散物质。溅蚀过程中不同降雨强度及降雨历时条件下,褐土和棕壤向下坡溅蚀率均高于向上坡溅蚀率,造成这种现象的原因是重力作用,在相同雨滴打击作用下,向上坡搬运相同土壤颗

粒需要更多的能量才会发生溅蚀。棕壤在降雨初期的溅蚀量明显高于褐土,可能是由于在相同雨滴打击作用下,褐土 $<0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量高于棕壤,褐土团聚体结构破坏率低于棕壤,褐土团聚体稳定性远优于棕壤,棕壤更容易被侵蚀。棕壤坡面不同

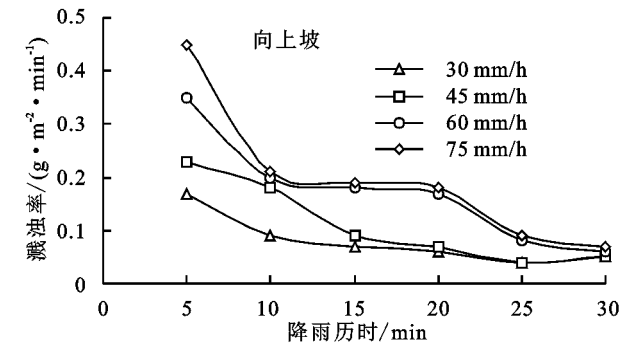


图 3 棕壤坡面不同方向溅蚀率随降雨历时的变化过程

通过图 2 和图 3 土壤溅蚀率(向上坡、向下坡)与降雨历时走势及筛选土壤溅蚀率与降雨历时拟合结果的效果可知,最终褐土溅蚀率和降雨历时的关系选择二项式关系,棕壤溅蚀率和降雨历时的关系选择对数关系。由表 3 土壤溅蚀率与降雨历时的关系可知,褐土溅蚀率与降雨历时之间具有较好的二项式关系,说明溅蚀率在每个雨强下都存在一个峰值。通过前人^[1,6,34-35]研究土壤溅蚀的经验可认为,褐土在 5 min 之前,土壤表面的细小土粒在雨滴打击作用下溅散开,土体保持原有结构,为溅蚀的初始阶段;在 5~25 min,随着降雨的进行,土壤含水量持续上升,

表 3 褐土和棕壤溅蚀率与降雨历时的关系式

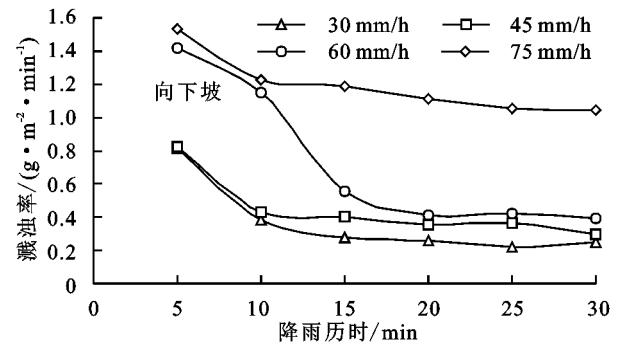
降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	褐土向上坡		褐土向下坡		棕壤向上坡		棕壤向下坡	
	关系式	R ²	关系式	R ²	关系式	R ²	关系式	R ²
30	$y = -5\text{E-}05x^2 + 0.003x + 0.011$	0.758	$y = -0.0002x^2 + 0.007x + 0.059$	0.781	$y = -0.068\ln x + 0.269$	0.914	$y = -0.309\ln x + 1.204$	0.837
45	$y = -0.0002x^2 + 0.012x - 0.023$	0.819	$y = -0.0004x^2 + 0.037x - 0.029$	0.851	$y = -0.113\ln x + 0.417$	0.943	$y = -0.263\ln x + 1.155$	0.842
60	$y = -0.0002x^2 + 0.015x - 0.041$	0.781	$y = -0.0005x^2 + 0.053x - 0.126$	0.935	$y = -0.151\ln x + 0.583$	0.938	$y = -0.644\ln x + 2.549$	0.880
75	$y = -0.0002x^2 + 0.018x - 0.049$	0.868	$y = -0.0007x^2 + 0.062x - 0.129$	0.880	$y = -0.196\ln x + 0.729$	0.918	$y = -0.268\ln x + 1.917$	0.951

注: x 为降雨历时(min); y 为土壤溅蚀率($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$)。

2.2 褐土和棕壤坡面土壤总溅蚀率和净溅蚀率的动态变化过程

由图 4 和图 5 可知,在同一雨强下,褐土和棕壤坡面总溅蚀率和净溅蚀率的动态变化规律一致,不同雨强下,褐土坡面总溅蚀率和净溅蚀率的动态变化过程可以划分为缓慢增加、迅速增加、快速下降和相对稳定 4 个阶段。而棕壤总溅蚀率和净溅蚀率均随降雨进行表现为迅速减少并逐渐趋于稳定的趋势。在 10~25 min,褐土总溅蚀率和净溅蚀率的变化幅度显著大于其他时间段,总溅蚀率和净溅蚀率受该段时间雨强的影响较大。这是因为降雨初期溅蚀率较低,主要是降雨对土壤团聚体破坏的过程,随着时间的增加,降雨强度的增加导致雨滴能量增大,此时雨滴打击力决定溅蚀率的大小,张科利等^[36]研究也得出溅

方向溅蚀率达到最大值的时间早于褐土坡面,这是由于相同雨滴打击作用下,与棕壤坡面相比,褐土坡面团聚体稳定性更好,不易形成结皮,而形成的结皮能阻止溅蚀的持续发展。这与 Bu 等^[32]和胡霞等^[33]研究结果一致。



土壤表层逐渐出现积水,当水深增加到与雨滴大小相当时,溅蚀率出现最大值;在 25 min 之后,薄层积水水深增加,雨滴对土体的击溅作用基本结束。随着降雨强度的增大,拟合方程的一次项系数(绝对值)增大,向上坡和向下坡分别由 0.003 和 0.007 增加到 0.018 和 0.062,说明降雨强度的增大对溅蚀率影响明显。棕壤溅蚀率与降雨历时之间具有较好的对数关系,随降雨强度的增大,棕壤向上坡拟合方程的 x 项系数(绝对值)由 0.068 增加到 0.196,说明降雨强度的增大对向上坡溅蚀率影响明显,而与向下坡溅蚀率无明显规律。

蚀强度随雨强增大而增大的研究结果。棕壤在 30, 45, 75 mm/h 雨强时总溅蚀率和净溅蚀率快速下降期为 5~10 min,而 60 mm/h 时总溅蚀率和净溅蚀率快速下降期为 10~15 min,且此期间下降幅度远大于其他 3 个降雨强度总溅蚀率和净溅蚀率快速下降期时的下降幅度,这是因为 60 mm/h 雨强条件下雨滴携带的降雨能量达到了使棕壤团聚体破碎的临界值,降雨强度高于 60 mm/h 时,对棕壤土壤团聚体的破坏加剧,造成较大的土壤流失。

2.3 褐土和棕壤不同粒级溅蚀颗粒增长率的动态变化过程

溅蚀率的变化,实际上是在单位时间内不同粒级溅蚀颗粒变化的外在表现^[35],因此可以计算单位时

间内溅蚀颗粒增加量来分析不同粒级团聚体在溅蚀过程中的变化情况。由表 4 可知,褐土在降雨历时为 0~5 min 时,不同粒级溅蚀颗粒增长率增幅较缓,降雨历时为 5~20 min 时,增幅逐渐增大,其中 0.25~0.50,0.5~1 mm 粒级团聚体增长率增幅最大,分别为 1.03~2.18,0.63~1.21 g/min,降雨历时为 20~25 min 时,1~2,2~5 mm 粒级溅蚀颗粒增长率呈增加趋势,其他粒级溅蚀颗粒增长率均减小。当降雨历时为 25~30 min 时,所有粒级溅蚀颗粒增长率均逐渐减小。棕壤 5~10 min 时的增长率大于其他降雨历时,其中<0.25,0.25~0.50,0.5~1 mm 粒级团聚体增长率,分别为 2.18,3.21,1.75 g/min,降雨历时为 10~15 min 时,1~2,2~5 mm 粒级溅蚀颗粒增

长率继续增加,而其他粒级溅蚀颗粒增长率呈减小趋势。当降雨历时为 15~30 min 时,所有粒级溅蚀颗粒增长率均逐渐减小。对比图 4 和图 5 可知,褐土和棕壤到一定降雨历时后,所有粒级溅蚀颗粒增长率均逐渐减小,造成这种变化趋势的原因是在模拟降雨溅蚀过程中,大粒级团聚体迁移存在的滞后性,而小粒级团聚体具有优先选择性。褐土和棕壤溅蚀率的变化主要以小粒级的溅蚀颗粒变化为主,褐土和棕壤小粒级颗粒完成迁移的临界值的降雨历时分别为 20~25,10~15 min,这与褐土和棕壤不同坡面溅蚀率、总溅蚀率和净溅蚀率动态变化研究得出结果一致。周一杨^[35]研究典型黑土击溅侵蚀也证明了溅蚀率主要以小粒级溅蚀颗粒变化为主。

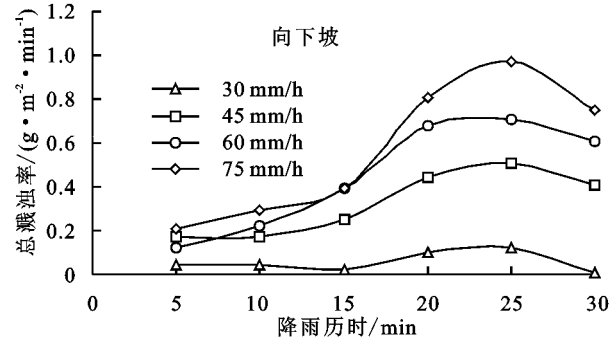
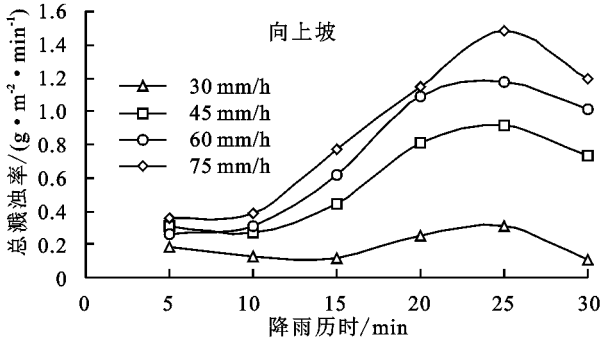


图 4 不同降雨强度下褐土溅蚀规律

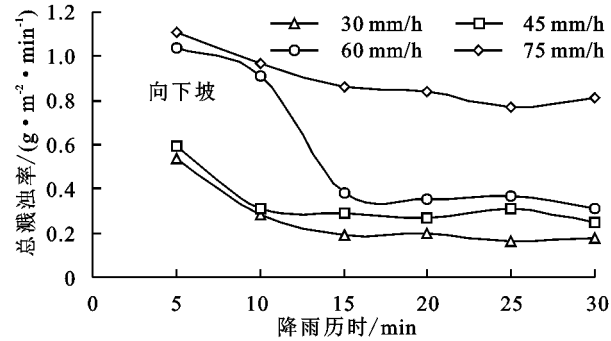
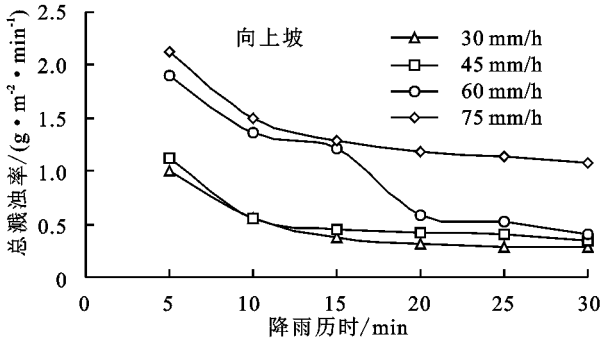


图 5 不同降雨强度下棕壤溅蚀规律

表 4 褐土和棕壤不同粒级溅蚀颗粒增长率

降雨 历时/min	褐土不同粒级溅蚀颗粒增长率/(g·min ⁻¹)						棕壤不同粒级溅蚀颗粒增长率/(g·min ⁻¹)					
	>5 mm	2~5 mm	1~2mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
0~5	0	0	0.02	0.12	0.19	0.21	0	0	0.28	1.71	2.79	1.36
5~10	0	0	0.07	0.63	1.03	0.65	0	0	0.32	1.75	3.21	2.18
10~15	0	0.17	0.20	1.18	1.89	1.29	0	0.23	0.33	1.08	1.78	1.09
15~20	0	0.17	0.23	1.21	2.18	0.81	0	0.23	0.15	0.91	1.51	1.09
20~25	0	0.19	0.24	0.74	1.21	0.65	0	0.11	0.13	0.20	0.43	0.41
25~30	0	0.08	0.13	0.09	0.18	0.16	0	0.11	0.09	0.13	0.27	0.27

3 结论

(1)降雨强度由 30 mm/h 增加至 75 mm/h 时,褐土向上坡溅蚀率增加 1~3 倍,向下坡溅蚀率增加 1.17~5.37 倍;棕壤不同方向溅蚀率随着降雨历时逐渐减小并趋于稳定,棕壤向上坡溅蚀率在 75mm/h

时降幅最大为 84%,向下坡溅蚀率在 60 mm/h 时降幅最大为 73%。

(2)褐土土壤团聚体稳定性优于棕壤,棕壤更容易被侵蚀,且棕壤坡面也更容易形成结皮。

(3)褐土不同方向溅蚀率、净溅蚀率和总溅蚀率

达到最大值的临界值降雨历时均为 20~25 min,与小粒级颗粒完成迁移的降雨历时临界值一致。棕壤的小粒级颗粒完成迁移的降雨历时临界值与不同方向溅蚀率、净溅蚀率和总溅蚀率的降雨历时临界值一致,降雨历时为 10~15 min。

(4)褐土向上坡溅蚀率、向下坡溅蚀率、净溅蚀率和总溅蚀率皆与降雨历时呈二次多项式关系,而棕壤向上坡溅蚀率、向下坡溅蚀率、净溅蚀率和总溅蚀率皆与降雨历时呈对数关系。

参考文献:

[1] 郑粉莉,高学田.坡面土壤侵蚀过程研究进展[J].地理科学,2003,23(2):230-235.

[2] Morin J, Winkel J V. The effect of raindrop impact and sheet erosion on infiltration rate and crust formation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60 (4):1223-1227.

[3] Legout C, Legu  dois S, Bissonnais Y L. Aggregate breakdown dynamics under rainfall compared with aggregate stability measurements [J]. European Journal of Soil Science, 2005, 56(2):225-238.

[4] Ramos M C, Nacci S, Pla I. Effect of raindrop impact and its relationship with aggregate stability to different disaggregation forces [J]. Catena, 2003, 53:365-376.

[5] 马仁明,蔡崇法,李朝霞,等.前期土壤含水率对红壤团聚体稳定性及溅蚀的影响[J].农业工程学报,2014,30 (3):95-103.

[6] 高学田,包忠谟.降雨特性和土壤结构对溅蚀的影响[J].水土保持学报,2001,15(3):24-26,47.

[7] 郑子成,何淑勤,吴发启.降雨条件下耕作方式对地表糙度的溅蚀效应[J].农业工程学报,2009,25(11):103-108.

[8] 付玉,李光录,郑腾辉,等.雨滴击溅对耕作层土壤团聚体粒径分布的影响[J].农业工程学报,2017,33(3):155-160.

[9] 陈浩,蔡强国.坡度对溅蚀影响的初步试验研究[J].人民黄河,1986,38(1):36-38.

[10] 周一杨,王恩姮,陈祥伟.不同开垦年限黑土溅蚀与团聚体分选特征[J].应用生态学报,2009,20(10):2411-2416.

[11] 塔娜,王健,张慧芸,等.黄土耕作坡面溅蚀过程中微地形响应特征[J].水土保持通报,2016,36(1):110-114,345.

[12] 马仁明,王军光,李朝霞,等.降雨过程中红壤团聚体粒径变化对溅蚀的影响[J].长江流域资源与环境,2013, 22(6):779-785.

[13] 肖海,刘刚,赵金凡,等.雨滴机械打击和消散作用对土壤团聚体的破坏特征[J].土壤学报,2017,54(4):827-835.

[14] 金福一,王淑华,刘鸿菊.辽宁省土壤侵蚀分布特点及其防治对策[J].黑龙江水利科技,2010,38(2):148-149.

[15] 肖继兵,孙占祥,刘志,等.降雨侵蚀因子和植被类型及覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,

2017,33(22):159-166.

[16] 刘立权,凡胜豪,宋国献,等.辽宁省坡耕地现状与防治对策[J].中国水土保持,2015(4):15-18.

[17] 曹忠杰,蔡景平,何建明,等.辽宁省第四次土壤侵蚀遥感普查成果分析[J].水土保持应用技术,2007,27(5): 21-22.

[18] 张凯.辽西褐土耕层结构障碍因素分析及其耕作培肥措施研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2016.

[19] 李忠芳,唐政,李继光,等.长期施肥对辽西褐土区土壤有机碳含量和玉米产量的影响[J].土壤与作物,2013,2 (4):150-156.

[20] 刘前进.棕壤横垄土壤侵蚀特征及其影响因素[D].武汉:华中农业大学,2014.

[21] 阜新市土地志编撰办公室.阜新市土地志[M].辽宁 阜新:阜新市政府机关印刷厂,2001.

[22] 阜新市土壤普查办公室.阜新土壤[M].辽宁 阜新:阜新市政府机关印刷厂,1984.

[23] 农业标准出版研究中心.最新中国农业行业标准[M].北京:中国农业出版社,2012.

[24] 依艳丽.土壤物理研究法[M].北京:北京大学出版社,2009.

[25] 李叶鑫,吕刚,傅昕阳,等.降雨特性和坡度对辽西低山丘陵区坡耕地褐土溅蚀的影响[J].水土保持学报, 2019,33(4):37-43.

[26] 苏淑娜,田一梅,高波,等.人工模拟降雨装置的设计及其参数的率定[J].水土保持通报,2015,35(6):120-123.

[27] 唐继业,单丽,江秋兰.辽宁省无资料地区设计暴雨洪水计算方法的研究[J].水土保持科技情报,2003,23 (2):38-40,43.

[28] Morgan R P C. Field studies of rainsplash erosion [J]. Earth Surface Processes, 1978, 3(3):295-299.

[29] Legout C, Legu  dois S, Bissonnais Y L, et al. Splash distance and size distributions for various soils [J]. Geoderma, 2005, 124(3/4):279-292.

[30] 秦越,程金花,张洪江,等.北京市褐土区降雨参数对土壤溅蚀的影响[J].水土保持学报,2013,27(6):16-20.

[31] 胡伟,郑粉莉,边锋.降雨能量对东北典型黑土区土壤溅蚀的影响[J].生态学报,2016,36(15):4708-4717.

[32] Bu C F, Gale W J, Cai Q G, et al. Process and mechanism for the development of physical crusts in three typical Chinese soils [J]. Pedosphere, 2013, 23(3):321-332.

[33] 胡霞,蔡强国,刘连有,等.人工降雨条件下几种土壤结皮发育特征[J].土壤学报,2005,42(3):504-507.

[34] 范荣生,李占斌.坡地降雨溅蚀及输沙模型[J].水利学报,1993,38(6):24-29.

[35] 周一杨.典型黑土击溅侵蚀特征的研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2009.

[36] 张科利,细山田健三.坡面溅蚀发生过程及其与坡度关系的模拟研究[J].地理科学,1998,18(6):561-566.