

台田措施下坡面流土壤侵蚀水动力学特征

肖丛宇^{1,2}, 程金花^{1,2}, 姜群鸥¹, 朱慧鑫^{1,2}, 马铭泽^{1,2}, 程竞萱^{1,2}, 张 建^{1,2}

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.国家林业局水土保持重点实验室,北京 100083)

摘要:通过野外径流小区放水试验,研究2种台田类型(土坎,石坎)、3种台田级数(1,2,3级)、1种坡度(10°)、3种放水流量($0.5, 1, 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$)下坡面流土壤侵蚀过程,分析台田措施下坡面流土壤侵蚀水动力学特征。结果表明,台田级数对坡面流流态影响较大,增加台田级数可使坡面流波动性降低,台田类型对雷诺数影响相对较小。土壤分离速率总体随流量增大而增大,相同流量条件下,呈波动性增加后减少且逐渐趋于平稳的特征,两者相关关系用指数函数回归方程拟合($R^2 > 0.840$)。同类台田且田面宽度和相同条件下,土壤分离速率与台田级数呈负相关关系,阻力系数与流量呈负相关关系,坡面流土壤分离速率与阻力系数呈负相关关系。研究结果对认识坡面流土壤侵蚀的过程和规律具有重要意义,也为坡面侵蚀物理模型的建立提供参考。

关键词:坡面流;台田措施;土壤分离速率;阻力系数;水动力学参数

中图分类号:S157.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2019)04-0010-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.04.002

Hydrodynamic Characteristics of Soil Erosion in Overland Flow Under Terraced Field Measure

XIAO Congyu^{1,2}, CHENG Jinhua^{1,2}, JIANG Qun'ou¹,

ZHU Huixin^{1,2}, MA Mingze^{1,2}, CHENG Jingxuan^{1,2}, ZHANG Jian^{1,2}

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2.Key Laboratory of Soil and Water Conservation of the State Forestry Administration, Beijing 100083)

Abstract: A field erosion simulation experiment was carried out to study overland flow soil erosion process under 2 terrace types (soil, stone), 3 terrace ridges (1, 2, 3 ridge), 1 slope gradients (10°), and 3 water flow rates ($0.5, 1, 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$). The hydrodynamic characteristics of soil erosion in overland flow under terraced field measure were analyzed. The results showed that the terrace ridge had a great influence on the flow state of the overland flow. The Increasing in the number of terraces could reduce the fluctuation of the overland flow. The influence of terrace types on the Reynolds number was relatively small. The overall soil detachment rates increased with the increase of flow rates. Under the same flow conditions, the soil detachment rates increased first and then decreased, and gradually stabilized. The correlation between the two was fitted by exponential function regression equation ($R^2 > 0.840$). For the similar terrace type and field width, and under the same conditions, the soil separation rates were negatively correlated with the number of the field, and the drag coefficient was negatively correlated with the flow. The soil separation rates and the drag coefficient were negatively correlated. The research results could be great significance for understanding the process and law of soil erosion on overland flow, and also provide reference for the establishment of physical model of overland erosion.

Keywords: overland flow; terraced field measure; soil detachment rate; resistance coefficient; hydrodynamic parameter

土壤分离是土壤侵蚀的主要表现形式,而坡面流水动力学特征是土壤侵蚀过程的直观反映。研究坡面流水力学及土壤侵蚀动力学特征,对于认识坡面流土壤侵蚀的过程和规律具有重要意义,也可以为坡面

侵蚀物理模型的建立提供理论依据^[1-2]。目前坡面流研究主要为室内人工降雨结合模拟变坡土槽的方式^[3],通过计算坡面流水力学特征值进行统计分析^[4]。李勉等^[5]室内放水冲刷试验表明,层流、紊流

收稿日期:2019-03-01

资助项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项“奶水河流域农村面源污染综合控制与精准配置技术与示范”(2017ZX07101004004)

第一作者:肖丛宇(1994—),男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:congyu_xiao@163.com

通信作者:程金花(1979—),女,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀防治研究。E-mail:jinhua_cheng@126.com

1.2 数据获取及计算

为准确描述不同台田配置条件下坡面流过程中水流动力学特征及其对土壤侵蚀影响,本研究选取土壤分离速率、水流阻力系数、雷诺数、弗劳德数 4 个参数指标进行定量研究。坡面水动力学参数计算根据河流水力学理论和方法^[15],土壤侵蚀级段泥沙主要是土壤分离产生,其产生泥沙含量的多少可反映坡面流土壤侵蚀强度^[16],故本研究选择土壤分离速率这一指标来衡量土壤侵蚀程度。

(1)平均水深(h):游标卡尺(精度 0.02 mm)测量,每 30 s 测定 6 个观测点水深,取平均值为观测时段内观测断面平均水深。

(2)平均流速:流速用流速与水深的关系计算得到: $V=q/h$ 。式中: V 为断面平均流速(m/s); q 为断面单宽流量(m^2/s); h 为断面平均水深(m),高锰酸钾的染色法测定的断面平均流速作为校正。单宽流量的测定是通过断面瞬时流量 Q 与过水断面的宽度 B 比值,即: $q=Q/B$,瞬时流量 $Q=(Q_1+Q_2)/2$,入流观测断面流量 Q_1 采用流量计(DN20)测量并记录;出流观测断面流量 Q_2 采用体积法计算。

(3)雷诺数(Re):判别层流紊流定量标准,表征水流惯性力与黏滞力比值无量纲参数,公式为:

$$Re=\frac{VR}{v_m} \tag{1}$$

式中: Re 为坡面流雷诺数; R 为水力半径(m),近似等于径流深度 h ; v_m 为流体运动黏滞系数($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$),

$$v_m=\frac{0.01775}{1+0.337t+0.000221t^2}$$

式中: t 为水温($^{\circ}\text{C}$),取实测值 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(4)弗劳德数(Fr):判断缓流急流定量标准,表征水流惯性力与重力比值,公式为:

$$Fr=\frac{V}{\sqrt{gh}} \tag{2}$$

式中: V 为平均流速(m/s); g 为重力加速度(9.8 m/s^2); h 为水深(m)。

(5)水流阻力系数(f):根据试验实测雷诺数,判定冲刷过程中流态为层流与过渡流。因此,选用 Darcy—Weisbach 阻力系数对阻力进行研究:

$$f=\frac{8ghJ}{V^2} \tag{3}$$

式中: f 为 Darcy—Weisbach 阻力系数; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 ; J 为水流能坡,采用坡面比降近似代替。

(6)土壤分离速率(D_r):表征单位时间、单位面积,土壤颗粒从土体分离掉土壤量。

$$D_r=\frac{W_w-W_d}{t\times A} \tag{4}$$

式中: D_r 为土壤分离速率($\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$); W_w 为试验前土壤干土重(kg); W_d 为试验后土壤干土重(kg); t 为

冲刷时间(s); A 为土壤样本表面积(m^2)。

2 结果与分析

2.1 坡面流水力学特征

当降水强度超出地表下渗程度,坡面流才会形成^[17]。坡面流形成后,开始以漫流的形式对表层土壤进行冲刷,在逐渐沿着坡面流动过程中水深增大,流速加快,形成股流。股流冲刷坡面后产生细沟。由于坡面流研究理论基础不够完善,所以坡面流研究通常运用水力学明渠水流理论^[18]。不同流量下各坡面侵蚀水流水力学特征见表 2。

表 2 不同流量下各坡面侵蚀水流水力学特征

台田 编号	台田 类型	台田布设 方式	坡度/ ($^{\circ}$)	流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	雷诺数	弗劳德数
1	对照坡面	无	10	0.5	616	0.78
				1.0	1021	1.17
				1.5	1390	1.50
2	土坎台田	一级	10	0.5	389	0.41
				1.0	508	0.51
				1.5	714	0.72
3	土坎台田	二级	10	0.5	296	0.32
				1.0	444	0.44
				1.5	603	0.56
4	土坎台田	三级	10	0.5	237	0.25
				1.0	378	0.37
				1.5	532	0.49
5	石坎台田	一级	10	0.5	385	0.45
				1.0	495	0.57
				1.5	653	0.71
6	石坎台田	二级	10	0.5	283	0.32
				1.0	432	0.45
				1.5	562	0.54
7	石坎台田	三级	10	0.5	219	0.24
				1.0	350	0.35
				1.5	511	0.48

由表 2 可知,径流雷诺数随流量不同变化较大,相同流量下,各坡面雷诺数差异较大。在本试验坡度和流量范围内,坡面流雷诺数为 219~1 390。流量为 $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,雷诺数为 219~616,流态基本为层流流态,流量为 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,流态在层流和过渡流之间,雷诺数为 350~1 021,流量为 $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,流态基本为过渡流,雷诺数为 511~1 390。在相同坡面、不同流量条件下,随流量增加雷诺数不断变大,水流紊动程度随之增大,表明径流侵蚀力和输移能力相应增大。不同台田布设情况下,坡面流雷诺数存在差异。在相同流量条件下,雷诺数基本排列为 1 号坡面>2 号坡面>5 号坡面>3 号坡面>6 号坡面>4 号坡面>7 号坡面。显然,对照坡面下水流流态紊动最大,可能与对照坡面无台田布设,对水流阻力较小,流体动能相对较大有关。同时,横向比较也可看出,在台田台面宽度和相等的条件下,随台田布设级数增加,坡

面流雷诺数逐渐降低,表明台田的台面宽度大小对水流阻力影响不大,而台田布设级数影响更为明显;另一方面,在台田台面宽度和、台田级数相同的条件下,相同流量的石坎台田雷诺数高于土坎台田。

2.2 坡面流侵蚀水动力特征

在不同台田布设下,各坡面土体受侵蚀过程中,Darcy-Weisbach 阻力系数、土壤分离速率变化,可以

体现坡面土壤侵蚀过程及特征。

2.2.1 土壤分离速率随时间的变化规律 坡度为 10° 且不同台田布设方式下坡面,分析3个流量各坡面土体冲刷试验数据(图2)。

从图2可以看出,在相同坡度下,各土层土壤分离速率随径流量增大而逐渐增大,整体趋势表现为随冲刷时间增加其波动性先增加后减少,并逐渐趋于稳定的状态。

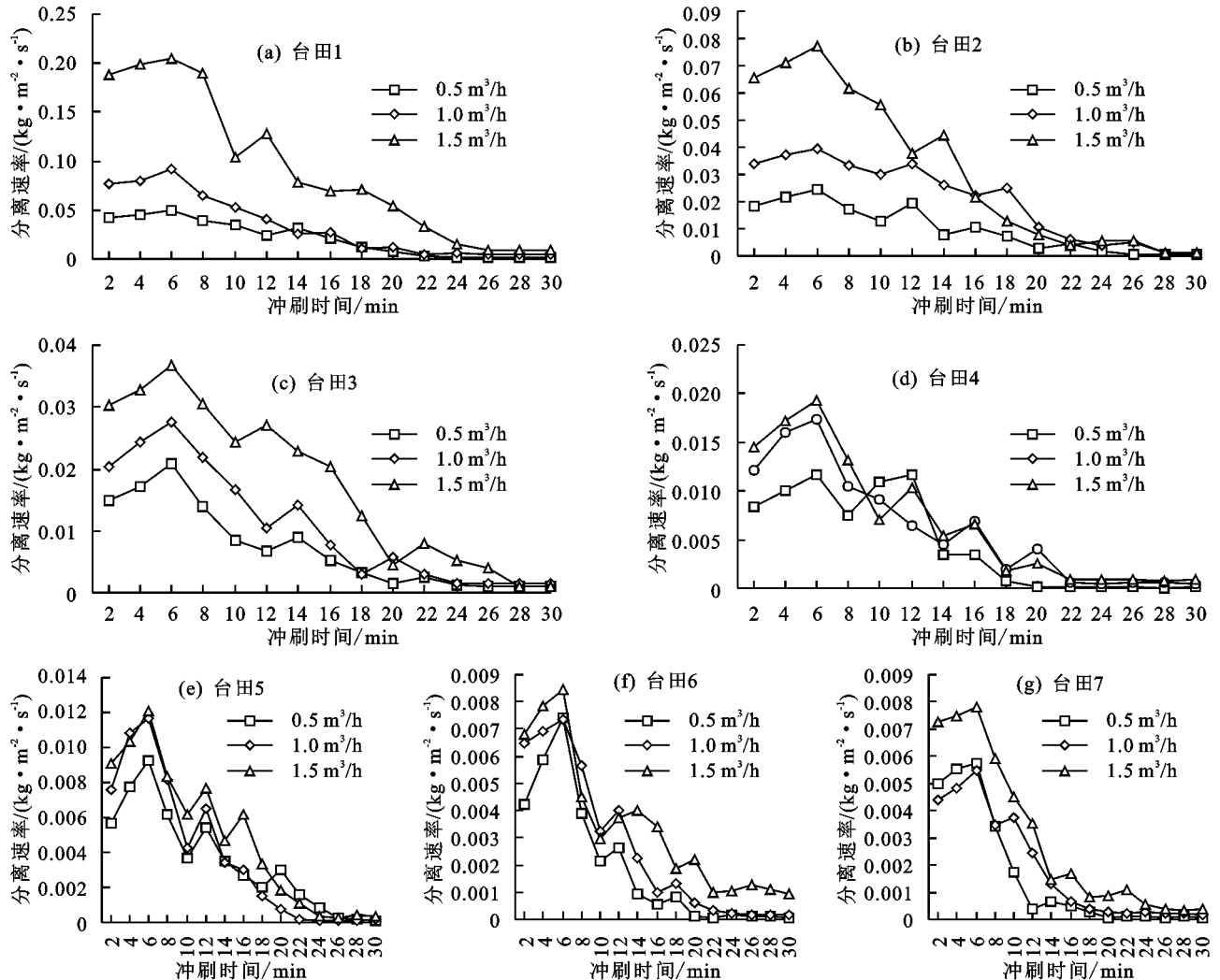


图2 各坡面不同流量下土壤分离速率变化曲线

由图2可知,在 10° 坡面、 $1.5\text{ m}^3/\text{h}$ 流量条件下,土壤分离速率最高, $1.0\text{ m}^3/\text{h}$ 流量次之, $0.5\text{ m}^3/\text{h}$ 流量下土壤分离速率最低。表明冲刷流量与土壤分离速率动态变化过程关系紧密,径流冲刷流量越大,土壤分离速率越大,且随着冲刷时间的推移,土壤分离速率动态变化趋于平缓。因此,有必要进一步定量分析流量对各坡面土壤分离速率的影响,对 10° 各坡面土壤分离速率随流量变化的试验数据作多元统计分析,得土壤分离速率与流量相关关系的回归方程见表3。

由表3可知,本试验条件下各坡面土壤分离速率与流量的相关关系可用乘幂回归方程拟合较好,相关性显著($R^2>0.840$)。同时,横向比较不同台田配置下下坡面土壤分离速率,可发现亦存在差异(图2a、

图2b、图2c),横向比较对照坡面、一级土坎台田坡面和一级石坎台田坡面土壤分离速率变化幅度,表现为1号坡面 $>$ 2号坡面 $>$ 5号坡面,表明相同放水条件下,对照坡面土壤分离速率变化幅度高于有台田布设的坡面,其中土坎台田坡面高于石坎台田坡面;对比土坎台田中的2,3,4号坡面分离速率动态变化发现,2号坡面 $>$ 3号坡面 $>$ 4号坡面,表明同类台田、台田的田面宽相同条件下,台田的级数越多,土壤分离速率变化趋势越平缓,土壤分离速率动态变化与台田布设类型和台田布设方式关系密切。

2.2.2 阻力系数与流量的相关关系 为探究试验坡面阻力与流量的相关关系,对 10° 各坡面阻力系数随流量变化的试验数据作多元统计分析,得阻力系数

与流量相关关系的回归方程(表 4)。回归结果表明, R^2 均大于 0.899, 显然阻力系数与流量关系密切, 阻力系数回归方程中, 流量 q 的指数为 $-0.679 \sim -0.316$, 均为负值, 表明两者呈负相关关系, 阻力系数动态变化随着流量的增加逐渐变小。由表 4 可知, 横向比较对照坡面、土坎台田坡面和石坎台田坡面阻力系数与流量的 R^2 , 表现为对照坡面 $>$ 石坎台田坡面 $>$ 土坎台田坡面, 其中对照坡面阻力系数减小幅度高于有台田布设的坡面, 表明随着流量的增加, 流量的增加对台田坡面的影响小于对照坡面, 且石坎台田高于土坎台田, 台田坡面可以提高坡面阻力。对比土坎台田中的 2, 3, 4 号坡面阻力系数与流量的 R^2 变化, 以及石坎台田中的 5, 6, 7 号坡面 R^2 后发现, 2 号坡面 $<$ 3 号坡面 $<$ 4 号坡面, 同时 5 号坡面 $<$ 6 号 $<$ 7 号坡面, 表明同类台田、台田的田面宽相同条件下, 台田的级数越多, 阻力系数与流量负相关性越高, 对产流产沙的抑制效果越好。

表 3 土壤分离速率与流量的回归关系					
台田 编号	台田 类型	台田布设 方式	坡度/ (°)	回归关系	R^2
1	对照坡面	无	10	$D_{r1}=0.0453q^{1.254}$	0.875
2	土坎台田	一级	10	$D_{r2}=0.0209q^{0.975}$	0.999
3	土坎台田	二级	10	$D_{r3}=0.0119q^{0.783}$	0.958
4	土坎台田	三级	10	$D_{r4}=0.006q^{0.369}$	0.989
5	石坎台田	一级	10	$D_{r5}=0.0041q^{0.281}$	0.905
6	石坎台田	二级	10	$D_{r6}=0.0027q^{0.507}$	0.994
7	石坎台田	三级	10	$D_{r7}=0.0022q^{0.534}$	0.840

注: D_r 为土壤分离速率($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); q 为流量(m^3/h)。

表 4 阻力系数与冲刷流量的回归关系					
台田 编号	台田 类型	台田布设 方式	坡度/ (°)	回归关系	R^2
1	对照坡面	无	10	$f_1=3.6854q^{-0.588}$	0.973
2	土坎台田	一级	10	$f_2=24.626q^{-0.679}$	0.889
3	土坎台田	二级	10	$f_3=42.355q^{-0.476}$	0.985
4	土坎台田	三级	10	$f_4=68.862q^{-0.633}$	0.987
5	石坎台田	一级	10	$f_5=15.328q^{-0.46}$	0.955
6	石坎台田	二级	10	$f_6=43.074q^{-0.316}$	0.965
7	石坎台田	三级	10	$f_7=64.729q^{-0.602}$	0.994

注: f 为 Darcy-Weisbach 阻力系数; q 为流量(m^3/h)。

2.2.3 土壤分离速率与阻力系数的关系 放水冲刷过程中, 流量越大, 土壤侵蚀速率和侵蚀程度越大^[19]。坡面流阻力动态变化影响因素中, 流量与阻力系数呈负相关关系^[20]。两者的研究表明阻力系数越大, 水流对土壤分离速率越小, 土壤侵蚀可以有效控制。研究不同流量条件下各坡面土壤分离速率与阻力系数的数据(图 2)可知, 不同流量下各坡面土壤分离速率均随阻力系数的升高而降低, 即土壤分离速

率与阻力系数成幂函数关系, 其回归关系表达式为: $y=ax^b$ 。由表 5 可知, 各坡面土壤分离速率随阻力系数的变化可用幂函数回归方程描述, f 指数均小于 0, R^2 均大于 0.931, 呈显著负相关关系。对照坡面的 R^2 小于其余各坡面, 表明在有台田布设条件下, 阻力系数与土壤分离速率关系越紧密, 进而说明布设台田提高坡面流阻力, 可以有效保持水土。

表 5 土壤分离速率与阻力系数的回归关系					
台田 编号	台田 类型	台田布设 方式	坡度/ (°)	回归关系	R^2
1	对照坡面	无	10	$D_{r1}=247.36f^{-2.372}$	0.928
2	石坎台田	一级	10	$D_{r2}=13.749f^{-1.789}$	0.996
3	石坎台田	二级	10	$D_{r3}=2.3607f^{-1.459}$	0.986
4	石坎台田	三级	10	$D_{r4}=0.0675f^{-0.669}$	0.963
5	土坎台田	一级	10	$D_{r5}=0.0281f^{-0.529}$	0.951
6	土坎台田	二级	10	$D_{r6}=0.081f^{-0.935}$	0.993
7	土坎台田	三级	10	$D_{r7}=0.086f^{-1.016}$	0.931

注: D_r 为土壤分离速率($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); f 为 Darcy-Weisbach 阻力系数。

3 讨论

径流雷诺数随坡面冲刷流量增加而变大, 坡面流流态从层流逐渐转变为过渡流。本研究中坡面流雷诺数随流量增加而不断变大, 该结果与丁文峰等^[21]的研究结果接近, 说明雷诺数与流量呈正相关关系在坡面流研究领域具有普遍性。流量较小时, 冲刷力较低, 径流小区坡面较平整, 坡面流波动变化不大, 径流流态基本为层流。流量增大时, 径流侵蚀力增强, 台田和坡面均出现跌坑、细沟, 造成坡面不平整, 雷诺数逐渐增大, 使得坡面流流态变为过渡流。台田级数对坡面流流态影响较大, 可使坡面流波动性降低, 作用明显, 台田类型和台面宽度对雷诺数影响相对较小。弗劳德数对不同台田布设下的水土流失过程解释性较弱。

坡面土壤分离速率总体随流量的增大而增大, 相同流量条件下, 呈波动性增加后减少又逐渐趋于平稳的特征, 两者相关关系可用指数函数回归方程拟合($R^2>0.840$), 相关性显著, 这与王秋霞等^[22]研究结论一致。冲刷流量越小, 水流总能量越小, 克服各种阻力做功后剩余总能量较小, 相应分离土壤能力降低, 土壤分离速率较小。前期分离速率较高主要是由于土体表面较为松动, 容易被侵蚀, 随着土壤润湿度增加, 土壤较为紧实, 不易被侵蚀, 因此中后期逐渐降低并趋于平缓。

石坎台田和土坎台田级数的增加都伴随着台田阻力系数的增大, 台田级数越多, 阻力系数越大。但由于土坎台田容易产生侵蚀沟和崩塌, 造成土壤分离加剧, 增加泥沙量, 而石坎台田的台级不会垮塌, 因此

石坎台田泥沙量削减效果能力远优于土坎台田,但两者与自然坡面相比都起到一定的泥沙量削减效果,本研究表明,土壤分离速率和阻力系数的动态变化与台田级数及台田类型关系密切,与台田相关的侵蚀水动力学研究几乎没有,类似于草被覆盖下的坡面流阻力研究较多,本次研究结果与肖培青等^[23]的研究结果类似。

台田级数对阻力系数、土壤分离速率影响较大,随台田级数增加,土壤分离速率变小,阻力系数变大。由于台面宽度和相等,台面宽度仅作为控制变量。该研究表明,土壤分离速率、阻力系数的动态变化与台田级数关系密切,而台面宽度对于水动力学参数的影响可进行后续研究。

由于台田对坡面流土壤侵蚀水动力学特征还受到其他因素的影响,例如坡度、土壤类型、土壤质地等。本研究只是在 10°坡面、粉砂壤土、褐土的试验条件下得出的结论,仅作为相关研究领域的补充,欠缺广泛的代表性,还需要更多的试验验证,来进一步阐明布设台田的坡面对产流产沙的削减效益,以及坡面流在台田影响下的土壤侵蚀水动力学特征。

4 结 论

(1)台田级数对坡面流流态影响较大,随台田级数增加坡面流波动性降低。台田类型对坡面流土壤侵蚀及水动力学特征影响不大。

(2)台田坡面与对照坡面的土壤分离变化规律一致,呈波动性增加后减少又逐渐趋于平稳的特征,由于土坎台级垮塌的存在,表现为 D_r (石坎台田) $<D_r$ (土坎台田) $<D_r$ (对照坡面)。

(3)同类台田且田面宽相同条件下,土壤分离速率与台田级数呈负相关关系,阻力系数与流量呈负相关关系。台田级数越多,阻力越大,截流截沙效果越明显。

(4)坡面流土壤分离速率与阻力系数呈显著的幂函数关系,其表达式为: $y = ax^b$, 随台田级数的增加,阻力系数增大,土壤分离速率变慢,保持水土效果显著。

参考文献:

[1] 白清俊.黄土坡面细沟侵蚀带产流产沙模型研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,1999.

[2] 张光辉,卫海燕,刘宝元.坡面流水动力学特性研究[J].水土保持学报,2001,15(1):58-61.

[3] 徐震.草被冠层和根系对坡面径流输沙的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2011.

[4] 汪邦稳,肖胜生,张光辉,等.南方红壤区不同利用土地产流产沙特征试验研究[J].农业工程学报,2012,28(2):

239-243.

[5] 李勉,姚文艺,杨剑锋,等.草被覆盖对坡面流流态影响的人工模拟试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2009,17(4):513-523.

[6] 王玲玲,姚文艺,申震洲,等.草被覆盖度对坡面流水力学参数的影响及其减沙效应[J].中国水土保持科学,2009,7(1):80-83.

[7] 朱慧鑫,胡晓静,程金花,等.草被覆盖下坡面流土壤侵蚀水动力学特征[J].东北农业大学学报,2018,49(7):48-57.

[8] 戴矜君,程金花,张洪江,等.植被覆盖下坡面流阻力变化规律[J].水土保持学报,2016,30(2):44-49.

[9] Abrahams A D, Li G, Parsons A J. Rill hydraulics on a semiarid hillslope, southern Arizona[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2015,21(1):35-47.

[10] 张科利,唐克丽.黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究[J].土壤学报,2000,37(1):9-15.

[11] 任熠,王先拓,王玉宽,等.紫色土坡面细沟流的水动力学特征试验研究[J].水土保持学报,2007,21(6):39-42.

[12] 张光辉.坡面薄层流水动力学特性的实验研究[J].水科学进展,2002,13(2):159-165.

[13] 李勉,姚文艺,陈江南,等.草被覆盖下坡面—沟坡系统坡面流阻力变化特征试验研究[J].水利学报,2007,38(1):112-119.

[14] 杨春霞,王丹,王玲玲,等.草被覆盖度对坡面流水动力学参数的影响[J].中国水土保持,2008(9):36-38.

[15] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面细沟发育过程中含沙量与水动力学参数的关系[J].水土保持学报,2013,27(5):1-6.

[16] Nearing M. Hydraulics and erosion in eroding rills[J]. Water Resources Research,1997,33(4):865-876.

[17] 谢亚茹,程金花,李语晨,等.黄土区土壤结皮和垄高对坡面产流产沙的影响[J].东北农业大学学报,2017,48(10):42-49.

[18] 郭太龙,卓慕宁,李定强,等.华南红壤坡面侵蚀水动力学机制试验研究[J].生态环境学报,2013,22(9):1556-1563.

[19] 丁文斌,史东梅,何文健,等.放水冲刷条件下工程堆积体边坡径流侵蚀水动力学特性[J].农业工程学报,2016,32(18):153-161.

[20] 戴矜君,程金花,张洪江,等.野外放水条件下坡面流水动力学特征[J].中国水土保持科学,2016,14(3):52-59.

[21] 丁文峰,李占斌,丁登山.坡面细沟侵蚀过程的水动力学特征试验研究[J].水土保持学报,2002,16(3):72-75.

[22] 王秋霞,丁树文,邓羽松,等.花岗岩崩岗区不同土层的侵蚀水动力学特征[J].土壤学报,2017,54(3):570-580.

[23] 肖培青,姚文艺,申震洲,等.草被覆盖下坡面径流入渗过程及水力学参数特征试验研究[J].水土保持学报,2009,23(4):50-53.