含水量、坡度和流量对土壤分离能力的影响

李 敏^{1,2},张含玉²,刘前进^{1,2}

(1.山东师范大学地理与环境学院,济南 250014;

2. 山东省水土保持与环境保育重点实验室,临沂大学资源环境学院,山东临沂 276005)

摘要:土壤分离过程为侵蚀产沙提供了物质准备,对其发生、发展的过程进行准确模拟具有重要的实践和 理论意义。选取棕壤为研究对象,设计 6 个土壤含水量(3%,6%,9%,12%,15%,18%)、3 个坡度(5°,10°, 15°)和 3 个流量(8,12,16 L/min),分析含水量、坡度和流量对土壤分离能力的影响。结果表明:(1)土壤分 离能力均随含水量的增大呈下降趋势,且土壤分离能力间的差异随含水量的增大而减小,当含水量 18% 时,土壤分离能力几乎为 0。土壤分离能力与含水量呈现二次多项式关系,在含水量 3%时,土壤分离能 力最高。(2)土壤分离能力在含水量 6%,9%,12%,18%时均随坡度的增大而增大,并且与坡度呈二次多 项式关系,在坡度 15°时,土壤分离能力达到最大。(3)土壤分离能力在含水量 3%~12%均随流量的增大 而增大,并且与流量呈二次多项式关系,流量为 16 L/min 时,土壤分离能力最大。(4) 仅考虑两者对土壤 分离能力的影响,误差的贡献率均为最高。若考虑三者的影响,坡度对土壤分离能力变异的贡献率最大 (29.64%),其次为含水量(22.29%)和流量(19.72%),土壤分离能力的模拟精度分别由 0.550,0.638, 0.498显著提高到 0.995。

关键词:含水量;坡度;流量;土壤分离能力;棕壤
中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2018)05-0035-06
DOI:10.13870/j. cnki. stbcxb. 2018.05.006

Effects of Soil Moisture Content, Slope Gradient and Flow Discharge on Soil Detachment Capacity

LI Min^{1,2}, ZHANG Hanyu², LIU Qianjin^{1,2}

(1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014; 2. Shandong Key Laboratory of Soil Conservation and Environmental Protection, College of Resource and Environment, Linyi University, Linyi, Shandong 276005) Abstract; Soil detachment process provides material for soil erosion, which is importance for understanding soil erosion process and building soil erosion model. In this study, the Brown soil was selected as the research object. Six soil moisture contents (3%, 6%, 9%, 12%, 15% and 18%), three slope gradients (5°, 10° and 15°), and three flow discharges (8, 12 and 16 L/min) were designed. The effects of soil moisture content, slope gradient and flow discharge on soil detachment capacity were explored. The results showed that: (1) As soil moisture content increased, soil detachment capacity decreased, and the differences of soil detachment capacity decreased; the detachment capacity was almost 0, when soil moisture content was 18%. There was a quadratic polynomial function between soil detachment capacity and soil moisture content, and soil detachment capacity was the highest when soil moisture content was 3%. (2) Soil detachment capacity increased with increasing of slope gradient when soil moisture content were 6%, 9%, 12% and 18%, respectively, and a quadratic polynomial relationship exsited between soil detachment capacity and slope gradient. When the slope gradient was 15°, soil detachment capacity reached the maximum. (3) Soil detachment capacity increased with increasing of flow discharge when soil moisture content was $3\% \sim 12\%$, and had a quadratic polynomial relationship with flow discharge. When flow discharge was 16 L/min, soil detachment capacity had the maximum value. (4) If only considered the influence of two factors, the contribution rate of the error was the largest. With three factors included, the contribution rate of slope gradient to the variation of soil detachment capacity was the largest (29.64%), followed by soil moisture content (22.29%) and flow dis-

收稿日期:2018-04-21

charge (19.72%). The simulation accuracy of soil detachment capacity could be increased from 0.550, 0.638 and 0.498 to 0.995 by including soil moisture content, flow discharge and slope gradient.

Keywords: soil moisture content; slope gradient; flow discharge; soil detachment capacity; Brown soil

土壤分离、输移和沉积是土壤侵蚀的三大主要过 程,而土壤分离过程是精确预报土壤侵蚀过程模型的 基础。分离过程是指在降雨溅击或径流冲刷作用下, 土壤颗粒脱离母质的过程,它为侵蚀产沙提供了物质 准备^[1]。土壤分离速率是单位时间、单位面积的产沙 量,当含沙量为零时,坡面径流具有最大的分离能 力^[2-3]。土壤分离能力是土壤侵蚀模型中的一个重要 参数,因此,解析不同条件下土壤分离能力及其影响 因素,对土壤侵蚀预报模型具有重要的意义^[4]。

影响径流分离土壤过程的因素很多,包括水力参 数、土壤参数等,国内外许多学者[5-7]对其做了相应研 究并取得了一定的成果。Nearing 等^[3]首次利用变 坡水槽试验,在控制条件下模拟了坡度、水深对土壤 分离速率的定量影响,发现土壤分离速率与水深、坡 度间呈对数关系;张光辉等[8]用变坡试验水槽,系统 研究了扰动回填土的分离过程,结果表明,土壤分离 速率与水流功率间关系比较密切,同时受冲刷时间的 影响^[1]。目前,对土壤分离过程的研究多集中于径流 冲刷试验。土壤含水量是影响坡面土壤侵蚀过程的 一个重要因素,Simon 等^[9]和 Fox 等^[10]研究表明,近 地表水文条件对土壤分离速率的变化具有决定性作 用。张光辉等[11] 控制土壤含水量条件下利用变坡水 槽试验,在较大流量和坡度范围内,系统研究了黄土 区原状土壤分离过程的水动力学机理。柳玉梅等[12] 将土壤含水量达到饱和,在不同坡度和流量组合条 件下,发现土壤分离速率与坡度和流量呈良好的线 性关系。然而,目前研究多为特定的含水量或不同坡 度和流量条件下对土壤分离能力的影响,关于土壤 分离能力和含水量、坡度、流量之间的准确关系尚不 确定。因此,开展不同含水量、坡度和流量的耦合作 用对坡面土壤分离能力的研究影响,对于分析水动 力学特征、检验现有的土壤侵蚀物理模型,具有重 要的理论意义。

1 材料与方法

1.1 试验装置与土壤

试验于 2017 年 7—9 月在山东省水土保持与环 境保育重点实验室模拟降雨大厅进行。试验采用长 3.5 m,宽 0.2 m,高 0.09 m 的变坡水槽,坡度可在 0~30°间变化。在冲刷槽的顶端有一个深度为 0.4 m 的稳流槽,确保供水的稳定性,距离水槽尾端 0.2 m 处为土样室。供试土壤为棕壤,土壤颗粒组成采 用 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪(英国马尔文 公司)测定。按美国土壤质地标准(USDA)进行分类。黏粒、粉粒、砂粒含量分别为5.22%,48.74%, 46.04%,质地类型为砂质壤土。土壤采回实验室后 进行风干处理,并过2 mm 的土壤筛。

1.2 试验设计

设定 6 个含水量: 3%, 6%, 9%, 12%, 15%, 18%; 3 个坡度: 5°, 10°, 15°; 3 个流量: 8, 12, 16 L/min。采用完全设计对因子进行组合, 共 54 个处理, 每个处理重复 3 次, 总共进行 162 次冲刷试验。

1.3 研究方法

为了获得试验设计的不同含水量的样品,首先, 测定土壤初始含水量,根据土壤初始含水量和所要求 控制的含水量,结合所需土壤重量,计算添加的水量; 然后,将土壤置于搅拌机内,在搅拌的过程中,用喷雾 器将水均匀喷洒在土壤上,使土壤与水充分混合,喷 水完毕,关闭搅拌机。用刮刀将附着在搅拌机转筒内 壁上的土壤刮下,之后启动搅拌机再转动1min,使 其全部混合;最后,将搅拌均匀后的土壤放置在桶中, 密封保存 24 h,使水分再分配和土壤颗粒水化。

在填充前,利用烘干法测定土壤的实际含水量。 用填充装置对土壤模具进行填充,首先在模具上套上 套筒,为了使土壤受力均匀,所有的土样在装入模具 时,保证其烘干土在 850g;利用击实锤在相同的夯实 力下敲击 3下,使土壤容重控制在耕作土壤的范围内 (1.23~1.62g/cm³);然后,用刮刀削掉多余部分,使土 层表面与模具边壁保持相同的高度;最后,为防止表层 土壤水分蒸发,用保鲜膜密封土壤表面,放置 24 h。

将填充好的模具放入水槽底部圆形土样室内,根 据设计好的坡度和流量,进行冲刷。放水过程中待水 流稳定后测定水深,每个坡度和流量测定9次,去掉 1个最大值和1个最小值,将剩余的7个水深平均获 得该坡度和流量下的平均水深,水深测定在距水槽下 端0.4~0.6 m范围内进行。水流表面流速用染色 法测定,记录染色水流流过距水槽下端0.3 m以上1 m长测速区所用的时间,用1除以时间得水流表面流 速。水流速度测定重复9次,去掉1个最大值和1个 最小值,将剩余7次平均获得平均水流表面流速,将 表面流速乘以0.7,获得水流平均流速。圆形土样室 中土样冲刷深度达到2 cm时,停止冲刷并用秒表记 录放水冲刷的时间。

冲刷结束后,将模具内剩余的土壤倒进铝盒中放 在烘箱里烘干。土壤分离能力通过土样冲刷前和冲 刷后的重量差来计算,计算公式[13]为:

$$D_r = \frac{M_0 - M_f}{At} \tag{1}$$

式中: D_r 为土壤分离能力(g/(cm² • s)); M_0 为冲刷 前土样的干重(g); M_f 为冲刷后土样的干重(g);A为 土壤模具面积(84.91 cm²);t为冲刷时间(s)。

采用 SPSS 19.0 软件进行数据分析,采用 Origin 9.1 软件进行曲线拟合和作图。

2 结果与分析

2.1 含水量对土壤分离能力的影响

土壤含水量是影响土壤侵蚀的主要因素之一。 由图1可知,不同流量、不同坡度条件下,土壤分离能 力均随着土壤含水量的增大基本呈下降的趋势。 Defersha 等^[14]研究表明,土壤含水量对细沟间的侵 蚀率十分显著,潮湿土壤流失量比干燥土壤的减少 50%。Singh 等^[15]在3种不同的径流剪切力作用下, 对不同含水量的土壤分离能力进行研究得出,土壤分 离能力随含水量的增大呈降低的趋势。由于坡度和 流量的不同,土壤分离能力在干湿条件下存在很大的 差异:在低含水量下(3%)下,随着流量的增大,土壤 分离能力间的差异显著,土壤分离能力间的差异随含 水量的增大逐渐减小并且当含水量在18%时,土壤 分离能力在3个流量和坡度下的值几乎为0。Vermang 等^[16]以淤泥质土壤为研究对象,通过降雨模拟 试验发现,土壤流失随含水量的增大而减小,含水量 最大(24%)时,未产生土壤流失。原因是含水量决定 了土壤颗粒之间的黏结力,土壤崩解是团聚体破裂的 主要机制[15];当含水量较低时,土壤中截留的空气较 多,在干燥土壤快速湿润的过程中,由于截留的空气、 膨胀压力和重力会分离颗粒和小的团聚体,从而增大 土壤的崩解性[17],土壤分离能力大。随着土壤中含 水量的增加,小悬浮矿物颗粒在接触点上的沉降和胶 结作用加强了土壤黏结力[18],并且土壤中截留空气 的体积减小,土壤的崩解性减弱[15],因此导致土壤分 离能力下降。





化幅度很小,说明在低坡度、小流量下含水量对土壤 分离能力的影响不大。在坡度 10°、流量 12 L/min 下,土壤分离能力随着含水量的增大呈先上升后降低 的趋势。当含水量在 3%时,在流量 8,12 L/min 下 的土壤分离能力几乎相同,说明在中等坡度、中低流 量下,低含水量(3%)对分离能力的影响很小。而在 坡度 15°、流量 8 L/min 条件下,土壤分离能力随含水 量的增大呈现先上升后下降的趋势,在含水量 9% 时,土壤分离能力达到最高。

在不同流量、坡度下,随着含水量的增大,土壤分 离能力基本上呈减小的趋势,并与含水量呈现二次多 项式(D,=AW²+BW+C)形式的关系,相关系数 R² 均在 0.80 以上(表 1)。

表 1 土壤分离能力与含水量的关系

坡度/	流量/	描刊之田主	D^2
$(^{\circ})$	$(L \cdot min^{-1})$	侯拟力性式	Л
5	8	$D_r = -3 \times 10^{-6} W^2 - 0.0002W + 0.0054$	0.89
5	12	$D_r = -2 \times 10^{-5} W^2 - 0.0012 W + 0.0317$	0.85
5	16	$D_r = -3 \times 10^{-5} W^2 - 0.0026 W + 0.0611$	0.94
10	8	$D_r = 0.0002W^2 - 0.0058W + 0.0545$	0.80
10	12	$D_r = -0.0005W^2 + 0.0057W + 0.0439$	0.97
10	16	$D_r = -0.0006W^2 + 0.0012W + 0.1590$	0.98
15	8	$D_r = -0.0007W^2 + 0.0096W + 0.0362$	0.82
15	12	$D_r = -0.0005W^2 - 0.0023W + 0.2058$	0.95
15	16	$D_r = -0.0008W^2 - 0.0054W + 0.3407$	0.95

注:Dr 为土壤分离能力(g/(cm² • s));W 为土壤含水量(%)。

由图 2 可知,含水量低于 12%时,土壤分离能力 差异不显著;含水量高于 12%时,差异显著;总体上, 随着含水量的增大土壤分离能力表现为减少的趋势。 含水量为 3%时,土壤分离能力的值最大,为 0.101 8 g/(cm² • s),含水量为 18%时,土壤分离能力的值最 小,为 0.002 1 g/(cm² • s)。



2.2 坡度对土壤分离能力的影响

在不同含水量下,土壤分离能力随着坡度的增大 呈二次多项式的函数关系,柳玉梅等^[12]研究表明,土 壤分离速率与坡度呈线性增加的趋势;张光辉等^[19] 研究表明,随着坡度的增大,土壤分离速率基本呈线 性增加。本文研究了 6 种含水量下坡度对土壤分离 能力的影响,在此只列举了 9%和 12%两种含水量下 坡度与土壤分离能力的关系。由图 3 可知,当含水量 在 9%,12%时,随着坡度的增大,土壤分离能力也随 之增大,这种趋势在大流量(16 L/min)下尤为显著。 在含水量 3%、流量为 8 L/min 和含水量 15%、流量

土壤含水量9%

10

坡度/(°)

8 L/min

12 L/min

16 L/min

Δ

0

5

为16 L/min时,随着坡度的增大,土壤分离能力呈先 上升后下降的趋势。由此表明,含水量的差异可影响 土壤分离能力随坡度的变化规律。通过分析发现,在 大坡度(15°)下,土壤分离能力最高,为0.1117g/ (cm²•s),坡度越大,土壤分离能力也越大,并且3个 坡度的差异性是显著的(图4)。



图 3 不同含水量下土壤分离能力与坡度的关系

15



2.3 流量对土壤分离能力的影响

流量是影响土壤分离能力的另一个重要因素。 土壤分离能力与流量呈二次多项式关系,本文从6个 含水量中选择了9%和12%两种含水量下土壤分离 能力与流量的关系(图5)。在含水量3%~12%时,



随着流量的增大,土壤分离能力呈上升趋势,坡度越 大,土壤分离能力增加的越显著。张光辉等^[11]研究 表明,在不同的坡度下土壤分离速率与流量呈线性关 系;张光辉等^[19]认为,坡度较小时,土壤分离速率随 着流量的增大呈幂函数形式增加,随着坡度的增大, 流量对土壤分离速率的影响逐渐向线性逼近;王军光 等^[20]以红壤为研究对象,通过冲刷试验研究发现,土 壤分离速率也随流量的增大而增大。在含水量 15%、坡度为15°和含水量18%、坡度为5°时,土壤分 离能力随流量的增大呈先上升后下降的趋势,中低坡 度(5°和10°)下,土壤分离能力在8L/min 时基本一 致(图5)。通过分析发现,在16L/min 流量下,土壤 分离能力达到最大,为0.1002g/(cm² · s),并且3 个流量间的差异显著(图6)。



图 5 不同含水量下土壤分离能力与流量的关系

2.4 含水量、坡度和流量对土壤分离能力的影响

由表 2 可知,坡度、流量及其交互作用对土壤分 离能力的影响是显著的。误差对土壤分离能力的贡 献率大于坡度和流量的贡献率,为 47.34%,坡度和 流量的交互作用的贡献率最小,为 4.46%。由表 3 可知,含水量、坡度及其交互作用是显著的,误差的贡 献率最大,为 40.46%,两者交互作用的贡献率最小, 为 9.34%。由表 4 可知,含水量、流量及其交互作用 是显著的,误差的贡献率高达 56.15%,含水量和流 量的交互作用贡献率最低,为 4.25%。

由表 5 可知,土壤分离能力受到含水量、坡度和 流量的影响极其显著(P<0.01)。其中,坡度对土壤 分离能力的影响最大,贡献率为 29.64%,其次是含 水量和流量,贡献率分别为 22.29%和 19.72%。两

者交互作用的影响达到显著水平,其中含水量与坡度 的交互作用贡献率最高,为11.81%。三者的交互作 用也达到了显著性水平,但对土壤分离能力的贡献率 最低,为2.55%。



表 2 坡度和流量对土壤分离能力的影响和贡献率

因素	Ⅲ型平方和	df	均方	Sig.	贡献率/%
坡度	0.2385	2	0.1192	0.0000	29.06
流量	0.1587	2	0.0794	0.0000	19.14
坡度×流量	0.0453	4	0.0113	0.0012	4.46
误差	0.3620	153	0.0024		47.34
校正的总计	0.8044	161			

注:R²=0.550(调整 R²=0.527);×表示交互作用。下同。

表 3 含水量和坡度对土壤分离能力的影响和贡献率

因素	Ⅲ型平方和	df	均方	Sig.	贡献率/%
含水量	0.1795	5	0.0359	0.0000	21.06
坡度	0.2385	2	0.1192	0.0000	29.14
含水量×坡度	0.0953	10	0.0095	0.0000	9.34
误差	0.2911	144	0.0020		40.46
校正的总计	0.8044	161			

注: $R^2 = 0.638$ (调整 $R^2 = 0.595$)。

表 4 含水量和流量对土壤分离能力的影响和贡献率

因素	Ⅲ型平方和	df	均方	Sig.	贡献率/%
含水量	0.1795	5	0.0359	0.0000	20.57
流量	0.1587	2	0.0794	0.0000	19.03
含水量×流量	0.0622	10	0.0062	0.0199	4.25
误差	0.4040	144	0.0028		56.15
校正的总计	0.8044	161			

注: $R^2 = 0.498$ (调整 $R^2 = 0.438$)。

表 5	含水量。	、坡度和流	量对土壤分	·离能力的	影响和贡献率

因素	Ⅲ型平方和	df	均方	Sig.	贡献率/%
含水量	0.1795	5	0.0360	0.0000	22.29
坡度	0.2385	2	0.1192	0.0000	29.64
流量	0.1587	2	0.0794	0.0000	19.72
含水量×坡度	0.0953	10	0.0095	0.0000	11.81
含水量×流量	0.0622	10	0.0062	0.0000	7.69
坡度×流量	0.0453	4	0.0113	0.0000	5.61
含水量×坡度×流量	0.0212	20	0.0011	0.0000	2.55
误差	0.0037	108	0.0000		0.69
校正的总计	0.8044	161			

注: $R^2 = 0.995$ (调整 $R^2 = 0.993$)。

由表 2~表 5 可知,土壤分离能力与坡度和流量 的 R² 为 0.550,与含水量和坡度的 R² 为 0.638,与含 水量和流量的 R² 为 0.498,而与含水量、坡度和流量 的 R² 为 0.995,由此表明,将含水量、流量和坡度共 同引入土壤分离能力模型可以显著提高模拟精度。

3 结论

(1)在流量和坡度的不同组合下,土壤分离能力 随含水量的增大基本呈下降趋势,在干湿条件下,土 壤分离能力存在很大的差异,土壤分离能力间的差异 随含水量的增大逐渐减小。在不同坡度和流量下,土 壤分离能力随含水量的变化呈不同的趋势。此外,土 壤分离能力与含水量间呈二次多项式的关系。在含 水量 3%时,土壤分离能力最高。

(2)在不同含水量下,土壤分离能力随着坡度的 增大呈二次多项式关系。含水量的差异可影响土壤 分离能力随坡度的变化,含水量在6%,9%,12%, 18%时,土壤分离能力随坡度的增大而增大,在含水 量3%、流量为8L/min和含水量15%、流量为16L/ min时,土壤分离能力随坡度的增大呈先上升后下降 的趋势。当坡度在15°时,土壤分离能力最高。

(3)在不同的含水量下,土壤分离能力与流量呈 二次多项式关系。在含水量3%~12%时,土壤分离 能力随流量的增大呈上升趋势。在含水量15%、坡 度为15°和含水量18%、坡度为5°时,土壤分离速率 随流量的增大呈先上升后下降的趋势。流量为16 L/min时,土壤分离速率最大。

(4)如果仅考虑两者对土壤分离能力的影响,误 差的贡献率均大于坡度和流量、含水量和坡度、含水 量的流量的贡献率。若将三者都考虑在内,则坡度对 土壤分离能力的贡献率最大,为 29.64%。含水量、 流量和坡度的引入可以使土壤分离能力模型的模拟 精度分别由 0.550,0.638,0.498 显著提高到 0.995。

参考文献:

- [1] 张光辉. 冲刷时间对土壤分离速率定量影响的实验模拟 [J]. 水土保持学报,2002,16(2):1-4.
- [2] Zhang G H, Tang M K, Zhang X C. Temporal variation in soil detachment under different land uses in the Loess Plateau of China [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 34(9): 1302-1309.
- [3] Nearing M A, Bradford J M, Parker S C. Soil detachment by shallow flow at low slopes [J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(2): 351-357.
- [4] Li Z W, Zhang G H, Geng R, et al. Spatial heterogeneity of soil detachment capacity by overland flow at a hillslope with ephemeral gullies on the Loess Plateau [J].

Geomorphology, 2015, 248: 264-272.

- [5] Wang B, Zhang G H, Shi Y Y, et al. Soil detachment by overland flow under different vegetation restoration models in the Loess Plateau of China [J]. Catena, 2014, 116: 51-59.
- [6] Lei T W, Zhang Q W, Zhao J, et al. Soil detachment rates for sediment loaded flow in rills [J]. Transactions of the Asae, 2002, 45(6): 1897-1903.
- [7] Nachtergaele J, Poesen J. Spatial and temporal variations in resistance of loess-derived soils to ephemeral gully erosion [J]. European Journal of Soil Science, 2002, 53(3): 449-463.
- [8] Zhang G H, Liu B Y, Nearing M A, et al. Soil detachment by shallow flow [J]. Transactions of the Asae American Society of Agricultural Engineers, 2002, 45 (2): 351-357.
- [9] Simon A, Collison A J C. Pore-water pressure effects on the detachment of cohesive streambeds: Seepage forces and matric suction [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 26(13): 1421-1442.
- [10] Fox G A, Chuagor M L, Wilson G V. Erosion of noncohesive sediment by ground water seepage: Lysimeter experimentsand stability modeling [J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(6): 1822-1830.
- [11] 张光辉,刘宝元,何小武.黄土区原状土壤分离过程的水动 力学机理研究[J].水土保持学报,2005,19(4):48-52.
- [12] 柳玉梅,张光辉,韩艳峰.坡面流土壤分离速率与输沙率耦 合关系研究[J].水土保持学报,2008,22(3):24-28.

(上接第34页)

- [18] 岳本江. 延河流域水沙演变及对土地利用/覆被变化的 响应[D].北京:中国科学院研究生院,2015.
- [19] 安乐平,秦瑞杰,康廷祥,等.黄土丘陵沟壑区罗玉沟流域 水沙特性分析[J].中国水土保持,2014(12):36-39,69.
- [20] 姚文艺,茹玉英,康玲玲.水土保持措施不同配置体系的滞 洪减沙效应[J].水土保持学报,2004,18(2):28-31.
- [21] 王盛萍,张志强,孙阁,等.黄土高原流域土地利用变化 水文动态响应:以甘肃天水吕二沟流域为例[J].北京 林业大学学报,2006,28(1):48-54.

- [13] Geng R, Zhang G H, Ma Q H, et al. Soil resistance to runoff on steep croplands in Eastern China [J]. Catena, 2017, 152: 18-28.
- [14] Defersha M B, Quraishi S, Melesse A. The effect of slope steepness and antecedent moisture content on interrill erosion, runoff and sediment size distribution in the highlands of Ethiopia [J]. Hydrology and Earth System Sciences and Discussions, 2011, 15(7): 2367-2375.
- [15] Singh H V, Thompson A M. Effect of antecedent soil moisture content on soil critical shear stress in agricultural watersheds [J]. Geoderma, 2016, 262: 165-173.
- [16] Vermang J, Demeyer V, Cornelis W M, et al. Aggregate stability and erosion response to antecedent water content of a loess soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(3): 718-726.
- [17] Govers G, Everaert W, Poesen J, et al. A long flume study of the dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1990, 15(4): 313-328.
- [18] Kemper W D, Rosenau R C, Dexter A R. Cohesion development in disrupted soils as affected by clay and organic matter content and temperature [J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51(4): 860-866.
- [19] 张光辉,刘宝元,张科利.坡面径流分离土壤的水动力 学实验研究[J].土壤学报,2002,39(6):882-886.
- [20] 王军光,李朝霞,蔡崇法,等.坡面冲刷过程中红壤分离 速率定量研究[J].长江流域资源与环境,2011,20(1): 96-100.
- [22] 原翠萍,雷廷武,张满良,等.黄土丘陵沟壑区小流域治 理对侵蚀产沙特征的影响[J].农业机械学报,2011,42 (3):36-43.
- [23] 徐学选,刘普灵,琚彤军,等.黄土丘陵区燕沟流域水土 流失治理的水沙效应[J].农业工程学报,2012,28(3): 113-117.
- [24] 夏露,宋孝玉,李怀有,等.砚瓦川流域水沙演变特征及其 驱动因素分析[J].水土保持学报,2016,30(1):89-95.
- [25] 傅伯杰,邱扬,王军,等.黄土丘陵小流域土地利用变化对 水土流失的影响[J].地理学报,2002,57(6):717-722.