

草地覆盖坡面流水动力参数的室内降雨试验

李毅^{1,2}, 邵明安²

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所
黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 为研究两种典型黄土的坡面水力特性变化规律, 进行了室内人工降雨试验。以草地盖度为主要影响因子, 土壤质地和雨强为辅助影响因子进行分析。结果表明: 同一盖度下, 随雨强逐渐增大, 流量和流速也随之增加; 当盖度增加时, 流量和流速随之减小。流速随降雨历时的延长而逐渐增大; 当雨强增大时, 流速曲线整体抬高; 当覆盖度逐渐增大, 流速曲线整体降低。平均水深随流速增大而减小; 同一雨强下, 盖度增加时雷诺数 R_e 随之增加, 雷诺数 R_e 降低, 而 Darcy-Weisbach 阻力系数 f 及曼宁粗糙系数 n 均大致呈增加趋势; 对同一盖度, 雨强增加 F_r 随之减小, R_e 逐渐增加, 同时 f 和 n 均随之减小。因此草地覆盖度增加将改善坡面流体力性质, 总体上减小了坡面流速, 增加了阻力和粗糙度。

关键词: 草地覆盖度, 阻力系数, 流速, 降雨, 坡面流

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-10-0001-05

李毅, 邵明安. 草地覆盖坡面流水动力参数的室内降雨试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 1-5.

Li Yi, Shao Ming'an. Hydro-dynamic parameters of overland flow during laboratory rainfall experiments under grass coverage[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(10): 1-5.(in Chinese with English abstract)

0 引言

坡面流是降雨强度超过地面入渗能力情况下产生的薄层水流^[1,2]。在水文模型和侵蚀模拟中, 常用到 Darcy-Weisbach 方程和 Manning 公式, 其中前者常用于坡面漫流的大田和室内试验, 后者常用于明渠(槽)水流的研究, 但由于两方程使用的变量相同而且都受流态特征的影响, 因此其应用条件和范围并非截然不同^[3]。流速^[1,3]、坡度^[1,3]、雨滴动能^[4]、地面植被覆盖度^[5,6]、耕作方向^[7]等是影响坡面流水力特性(如地面糙率、水深及阻力系数等)的重要因子, 其中地面植被影响坡面水流性质的主要原因是其含有的粗糙介质改变了坡面的阻力^[8]。目前国内外对无覆盖和草地覆盖条件下坡面流水力特性方面已进行了相关研究^[9-20], 但对于坡面流体力性质的描述并不完善, 仅有的部分关于水力参数研究成果中, 针对水流糙率系数的变化规律进行的报导较多^[13,18-20], 且多限于特定土壤条件下的室内试验, 关于坡面水流流速变化特征及不同土壤水力性质的对比方面研究不多, 对于坡面草地覆盖降雨条件下不同土壤质地的水力性质变化及流速动态的描述较缺乏, 而这对于草被覆盖条件下坡面流的研究是极其重要的, 其研究对于坡度变化条件下土壤侵蚀机制、泥沙输移特征、土壤侵蚀模型等的深入研究具有重要的参考价值。本文拟针对黄土区两种质地土壤, 在种植黑麦草并形成一定覆盖度情况下, 采用人工降雨试验研究同一植被对不同土壤的水流阻力特征

及相关水力特性。

1 材料与方法

1.1 土壤采样

采用黄土区 2 种典型土壤, 分别从陕北黄土高原神木六道沟流域 0~20 cm 深度范围(土类为粉砂壤土, 土种为料姜绵土)和陕西杨凌西卜村农田 0~20 cm 深度范围(土类为灰钙土, 土种为斑斑黑油土)采集。用比重计法对土样进行颗粒分析, 得出前者质地为粉砂壤土, 后者质地为黏壤土。

1.2 试验处理及观测项目

在中国科学院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工降雨大厅, 完成不同草地盖度和雨强下的坡面降雨试验^[15,16]。土样研碎后过 5 mm 土筛, 采用 1.25 g/cm³ 的容重, 将土样分层均匀装至土槽。土槽长×宽×高=100 cm×50 cm×120 cm, 坡度可在 0~25°之间变化; 槽底有 $\phi 0.5$ cm 的梅花状排气孔, 装土深 110 cm, 槽出口设有 7 cm 高的多排孔和导流管以便引出径流。对所选 2 种土样, 均分别用 5 个槽装土, 以不同行距种入黑麦草种, 进行小雨强的预降雨以便草种发芽, 并将槽坡度调节到 25°, 室外放置 2 个月, 待平均高度达到 20~30 cm, 用方格法测定草地盖度, 并进行人工降雨试验。不同土样降雨场次及草地盖度同列于表 1。

表 1 不同土壤雨前草地盖度

Table 1 Grassland coverage degree for different soils before rainfall

土壤	降雨场次	草地盖度/%					
黏壤土	4	14.9	—	—	—	—	75.5
粉砂壤土	8	7.1*	17.3*	27.5*	40.5*	50.5*	96.0

注: 粉砂壤土盖度为两次种植黑麦草的统计值, *表示第一次种植; 一流速未测定, 因此不考虑盖度。

收稿日期: 2007-07-25 修订日期: 2008-03-03

基金项目: 西北农林科技大学“青年学术骨干”支持计划

作者简介: 李毅(1974—), 女, 陕西武功人, 博士, 副教授, 主要从事农业水资源利用研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。Email: liyikitty@126.com

参照黄土区典型降雨特征, 选定 1.0~2.2 mm/min 的不同雨强进行试验。雨滴降落高度 16.0 m, 雨滴接触土面时达到终点末速。预先进行 5 min 雨强初步率定, 正式降雨历时 60 min。为使各土槽雨强尽量均匀, 5 个土槽同时受雨。降雨开始后用秒表记时, 记录径流产生时间, 以产流开始时 1 min、产流 5 min 后 3 min 的间隔采径流样品。流速用染色剂(KMnO₄)法测定, 沿流线方向根据覆盖所占面积确定流程长度, 各槽分别观测。降雨过程中用容积为 20 cm×20 cm×20 cm 的量雨盒率定雨强 R 。测定的水体积 V 及降雨时间 t 与 R 之间关系为: $R=V/(20\times 20)t$ 。

2 基本理论

2.1 坡面承雨

采用直角坐标系进行分析, 见试验模拟简图(图 1)。考虑风的影响时, 落在倾斜坡面的雨量为:

$$I_a = I \cos \alpha \sin \beta \quad (1)$$

式中 I_a ——降落在倾斜地面上的雨量, 称为坡面净雨, mm; I ——降落在平面上的雨量, mm; α ——坡度; β ——雨滴着地轨迹线与水平面的夹角, °。室内人工降雨在无风时进行, 因此上式中 $\sin \beta = 1$ 。无风时的坡面雨强 R_a 为降雨雨强 R 的投影, 表达式为:

$$R_a = R \cos \alpha \quad (2)$$

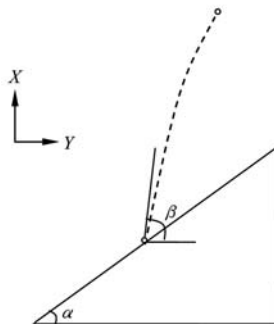


图 1 雨滴降落简图

Fig.1 Sketch map for raindrop falling

2.2 坡面流的水动力参数

坡面流水动力参数和流速及水深有一定的关系, 主要有 Darcy-Weisbach 阻力系数 f , 曼宁粗糙系数 n , 坡面水流雷诺数 R_e , 氟汝德数 F_r 等, 分别采用以下各式计算:

$$h = \frac{Q}{UBt}, \quad R_e = \frac{Uh}{\nu}, \quad F_r = \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad (3)$$

$$f = \frac{8ghS}{U^2}, \quad n = \frac{h^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}}{U} \quad (4)$$

式中 h ——水深, m; Q —— t 时间的径流量, m³; U ——平均流速, m/s; B ——过水断面宽度, m; ν ——水运动粘滞系数, m²/s; g ——重力加速度, m/s²; S ——水力坡度, 是坡度的正弦函数。

3 结果及讨论

3.1 不同处理的平均流量及断面平均流速

流速是坡面流的基本水动力学参数之一。在土壤质

地、草覆盖度 C 、雨强 R 等不同处理中, 根据试验资料可得出各取样时段相应的径流量 Q_i 和时段流速 U_i , 所有时段平均值分别为平均流量 Q 和断面平均流速 U , 在此基础上对各盖度下的流量和流速再分别平均, 两种土壤的流量和流速特征见表 2。

表 2 不同条件下的坡面流流量和平均流速
Table 2 Overland flow rate and average flow velocity under different conditions

土壤	C /%	R /mm·min ⁻¹	Q /10 ⁻⁶ m ³ ·s ⁻¹	U /cm·s ⁻¹	$Q_{均}$ /10 ⁻⁶ m ³ ·s ⁻¹	$U_{均}$ /cm·s ⁻¹
黏壤土	14.9	1.05	43.7	4.96	68.39	6.2
		1.47	57.19	5.95		
		1.7	69.71	6		
		2.02	102.95	7.91		
黏壤土	75.5	15.07	35.77	3.22	56.69	3.96
		17.7	48.52	3.85		
		28.46	58.93	3.91		
		67.49	83.55	4.85		
粉砂壤土	7.1	0.65	28.3	11.85	60.28	14.75
		1.1	48	13.94		
		1.23	65.2	15.68		
		2.03	99.6	17.51		
粉砂壤土	17.3	0.65	26.88	10.2	57.36	13.29
		1.1	40.58	12.33		
		1.23	57.86	14		
		2.03	104.13	16.63		
粉砂壤土	27.5	0.65	25.62	7.59	55.17	10.34
		1.1	30.37	8.74		
		1.23	52.58	10.22		
		2.03	112.13	14.82		
粉砂壤土	40.5	0.65	24.72	6.95	54.33	9.7
		1.1	36	8.14		
		1.23	56.51	9.82		
		2.03	100.1	13.87		
粉砂壤土	50.5	0.65	19.15	6.8	39.66	8.39
		1.1	21.74	8.09		
		1.23	34.82	8.49		
		2.03	82.94	10.2		
粉砂壤土	96.0	1.26	40.8	2.29	64.3	3.26
		1.58	61.46	2.52		
		1.82	71.92	2.97		
		2.25	83	4.04		

由表 2 可见: 在同一覆盖度下, 随雨强逐渐增大, 流量和流速也随之增加, 间接反映出流速是随流量的增大而增大的; 当粉砂壤土盖度由 7.1% 增加到 50.5% 时, 而黏壤土盖度由 14.9% 增加到 75.5% 时, 流量和流速(均为同一盖度的平均值) 也随之减小, 这一结果同样和潘成忠研究结果相符^[5]。因 96% 的盖度是粉砂壤土第二次种草形成, 因此不与第一次盖度对比。

3.2 流速的动态变化

坡面产流通常在降雨几分钟后开始, 不同土壤和植

被覆盖条件下产流开始时间不同。根据不同降雨时段的径流量可得相应的时段流速。根据试验资料和计算结果，时段流速的变化有特定规律，详见图 2。

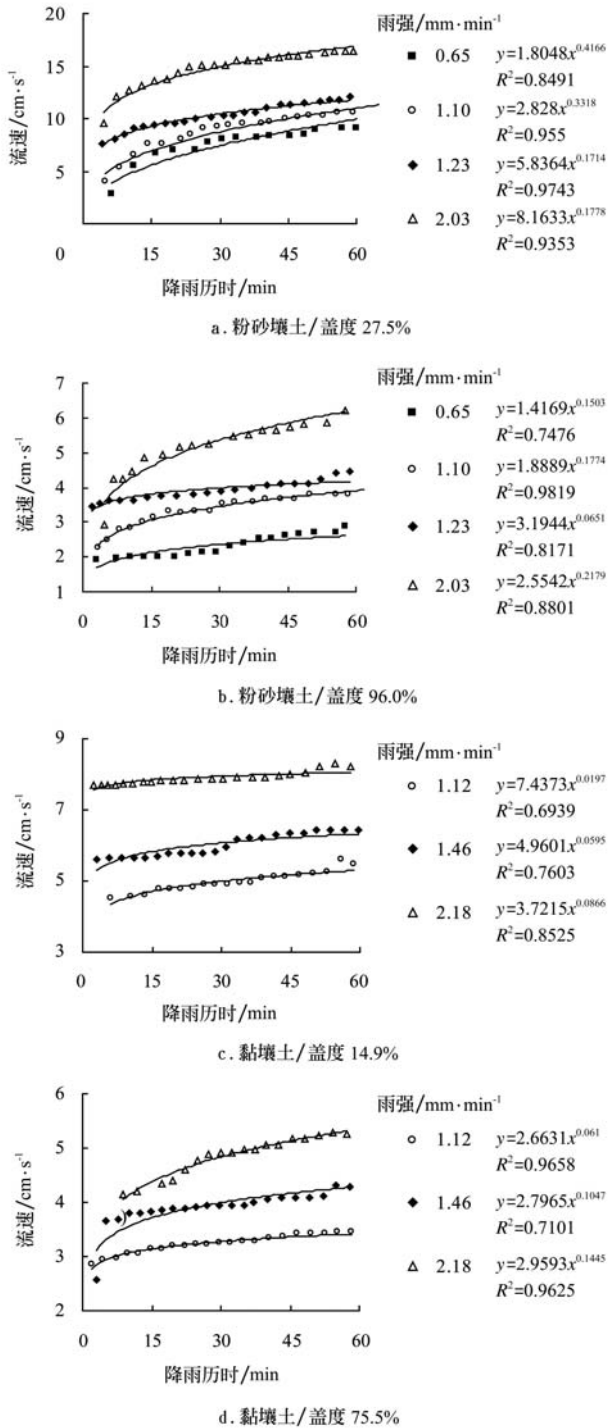


图 2 坡面水流流速随降雨历时的动态变化
Fig.2 Dynamic variation of overland flow velocity vs rainfall time

由图 2 可见：雨强、植被覆盖度、土壤质地和降雨历时的变化导致坡面水流流速存在差异。流速随降雨历时的延长而逐渐增大，但基本可依流速变化将产流分为瞬态流速段（流速随时间发生变化的初始产流阶段）和稳定流速段（流速基本趋于稳定的阶段）两个过程。图 2a~d 中，当雨强变化时，坡面水流流速在各盖度下和不同

同土质中均有相应变化。当雨强增大时，流速曲线整体抬高，且该特点对粉砂壤土尤其明显。如图 2a 中，当雨强分别为 0.65、1.10、1.23 及 2.03 mm/min 时，粉砂壤土初始流速分别为 2.90、4.00、7.67 及 9.50 cm/s；相应的稳定流速分别为 8.31、9.58、11.03 及 15.87 cm/s。植被覆盖度对流速也有不同程度的影响，以粉砂壤土为例（图 2a、b），当覆盖度逐渐增大，同一雨强下流速曲线整体降低，覆盖度为 96% 时，即使雨强很大（为 2.20 mm/min），流速也明显比 27.5% 盖度的低，最大流速仅为 6.07 cm/s。表明植被覆盖度增大能明显降低坡面水流速，从而降低水流侵蚀力。在不同土壤上植草时，坡面流速特征也明显不同。比较图 2a、c 两图，粉砂壤土盖度为 27.5%、雨强为 2.03 mm/min 的稳定流速为 15.87 cm/s，而黏壤土盖度为 14.9%、雨强为 2.18 mm/min 的稳定流速仅 7.88 cm/s，说明黏壤土的抗侵蚀力比粉砂壤土的强，其原因可能在于黏壤土中的黏粒含量较粉砂壤土高，因而其团聚性较粉砂壤土好。图 2c、d 两图中，黏壤土的瞬态流速均不明显。因两雨强 1.46 和 1.61 mm/min 差距不大，因此流速曲线随时间变化整体区别也不明显。两土壤不同盖度的流速随时间变化均可用幂函数关系描述，除个别情况下决定系数 R² 值较低外，大部分 R² 值较高，表明我们可以定量描述流速的动态变化。

3.3 水深的变化规律

和流速类似，水深也是坡面流的基本水动力学参数之一。根据式 (3)，基于各取样时段内流速和径流量可分别计算相应时段的水深，各时段平均后得不同土壤和植被盖度下的平均水深，不同情况下水深仅几毫米，这与张光辉^[1]、潘成忠^[5]、吴希媛^[12]等的水深数量级类似。对比不同土壤（粉砂壤土和黏壤土）发现，植被盖度明显影响平均水深，详见图 3，图例中 SL 为粉砂壤土，CL 为黏壤土。

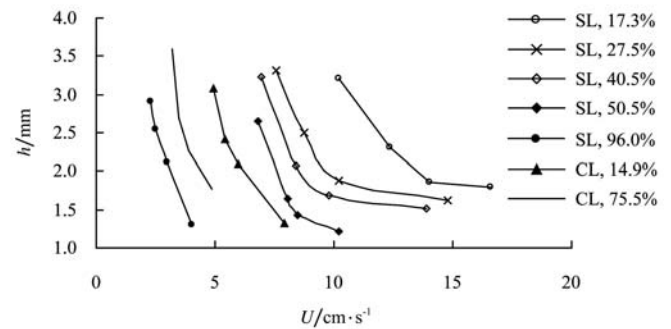


图 3 坡面流平均水深的变化
Fig.3 Variation trend of average water depth of overland flow

由图 3 可见，平均水深 h 随流速 U 的增大而减小，且当植被覆盖度增大时曲线整体左移，该规律对粉砂壤土和黏壤土均适用。此外，当盖度依次增加时，流速随之减小，说明草盖度增加能够明显延缓坡面水流速度，从而降低水流对坡面的侵蚀力，起到保持水土的作用。

3.4 其它水力性质的变化规律

根据式 (3) 及式 (4) 可分别计算不同雨强和盖度下的氟汝德数 F_r 、雷诺数 R_e 、Darcy-Weisbach 阻力系数 f

及曼宁粗糙系数 n 。 R_e 无量纲, R_e 和 F_r 均可用于判断水流流态, 当 $F_r > 1$ 时, 水流为急流, 否则为缓流。就土壤水力性质而言, Darcy-Weisbach 阻力系数 f 及曼宁粗糙系数 n 都反映坡面水流在坡地运动过程中所受阻力的相对大小, 阻力系数越大, 水流克服阻力所需的能耗就越大, 用于坡面侵蚀的动力就越小。将粉砂壤土各盖度和不同雨强组合下的水力性质分别列于表 3 和表 4。

表 3 粉砂壤土的水力性质(第一次种草)
Table 3 Hydraulic characteristics of silty loam soil (1st plantation)

水力参数	R /mm · min ⁻¹	盖度/%				
		7.1	17.3	27.5	40.5	50.5
F_r	0.65	0.81	0.57	0.42	0.39	0.42
	1.1	1.35	0.82	0.56	0.59	0.64
	1.23	1.56	1.04	0.75	0.76	0.72
	2.03	1.82	1.25	1.18	1.14	0.94
R_e	0.65	104	154	95	154	81
	1.1	212	245	215	179	74
	1.23	272	266	234	207	92
	2.03	318	530	519	446	155
f	0.65	12.2	24.2	45.2	52.6	45.1
	1.1	4.4	11.9	25.8	23	19.7
	1.23	3.3	7.4	14.1	13.7	15.5
	2.03	2.4	5.1	5.8	6.2	9.1
n	0.65	0.092	0.139	0.191	0.205	0.183
	1.1	0.049	0.092	0.137	0.126	0.112
	1.23	0.042	0.07	0.097	0.094	0.097
	2.03	0.036	0.058	0.06	0.062	0.072

表 4 粉砂壤土的水力性质(第二次种草, 盖度为 96.0%)
Table 4 Hydraulic characteristics of silt loam soil (2nd plantation, the grass coverage was 96.0%)

R /mm · min ⁻¹	1.26	1.58	1.82	2.25
F_r	0.09	0.11	0.12	0.12
R_e	110	90	67	63
f	437	314	189	63
n	0.58	0.48	0.36	0.19

由表 3 和表 4 可见: 对同一雨强, 盖度增加时 F_r 随之降低; 而对同一盖度, 雨强增加 F_r 也随之增加。当盖度为 96.0% 时, 不同雨强下 F_r 均较小。当雨强较大时, 大部分情况下坡面流为急流, 而当盖度较大时, 大部分情况下坡面流为缓流。两者组合情况下, 较小的雨强且盖度较大时坡面流为缓流, 这种情况下侵蚀程度较轻。对同一雨强, 盖度从 7.1% 增加到 50.5% 时 R_e 变化不一致, 但有降低趋势; 而对同一盖度, 雨强增加 R_e 逐渐增加。当盖度为 96.0% 时, 不同雨强下 R_e 均较小。对同一雨强, 盖度增加时 f 基本呈增加趋势; 而对同一盖度, 雨强增加 f 随之减小; 当盖度为 96.0% 时, 不同雨强下 f 均很大, 超过了其他盖度的相应值, 说明盖度增大明显增大了坡面流阻力系数, 从而减小了降雨侵蚀力。对同一雨强, 盖度增加时 n 基本呈增加趋势; 而对同一盖度, 雨强增加 n 随之减小。当盖度为 96.0% 时, 不同雨强下 n 均很大,

说明盖度增加提高了坡面粗糙度。

将不同土壤、盖度、雨强组合下的 Darcy-Weisbach 阻力系数 f 及曼宁粗糙系数 n 同绘于直角坐标系, 并回归可得 $n = 0.0235f^{0.5308}$ ($R^2 = 0.9967$)。根据式 (4), 两参量均由流速和水深计算得出, 该关系式说明 Darcy-Weisbach 阻力系数 f 及曼宁粗糙系数 n 在指示坡面水流阻力上的意义是类似的。

4 结论

1) 同一草地盖度下, 随雨强逐渐增大, 流量和流速也随之增加; 当盖度增加, 流量和平均流速随之减小。

2) 雨强、草地盖度、土壤质地和降雨历时的变化导致坡面水流流速存在差异。流速随降雨历时的延长而逐渐增大; 当雨强增大时, 流速曲线整体抬高; 当草地盖度逐渐增大, 同一雨强下流速曲线整体降低; 黏壤土的抗侵蚀力比粉砂壤土的强。

3) 平均水深 h 随水深 U 的增大而减小, 且当草地盖度增大时曲线整体左移。同一雨强下, 盖度增加时氟汝德数随之降低, 雷诺数有降低趋势; 而对同一盖度, 雨强增加氟汝德数随之增加, 雷诺数也逐渐增加。

4) 对同一雨强, 盖度增加时 Darcy-Weisbach 阻力系数 f 和曼宁粗糙系数 n 呈增加趋势; 而对同一盖度, 雨强增加 f 和 n 均随之减小。

致谢: 感谢 Martin Edward Parkes 博士对本文修改过程中给予的帮助。

[参 考 文 献]

- [1] 张光辉. 坡面薄层流动力学特性的实验研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(2): 159—165.
- [2] 王 夙, 孙三翔, 湖清华. 国内坡面流研究现状[J]. 甘肃水利水电技术, 2004, 40(4): 332—334.
- [3] Hessel Rudi, Jetten Victor, Zhang Guanghui. Estimating Manning's n for steep slopes. *Catena*, 2003, 54: 77—91.
- [4] Torri Dino, Regues David, Pellegrini Sergio, et al. Within-storm soil surface dynamics and erosive effects of rainstorms[J]. *Catena*, 1999, 38: 131—150.
- [5] 潘成忠, 上官周平. 牧草对坡面侵蚀动力参数的影响[J]. 水利学报, 2005, 36(3): 1—8.
- [6] Pan Chengzhong, Shangguan Zhouping. Runoff hydraulic characteristics and sediment generation in sloped grass-plots under simulated rainfall conditions[J]. *J Hydro*, 2006, 331: 178—185.
- [7] Ndiaye Babacar, Esteves Michel, Vandervaere Jean-Pierre, et al. Effect of rainfall and tillage direction on the evolution of surface crusts, soil hydraulic properties and runoff generation for a sandy loam soil[J]. *J Hydro*, 2005, 307: 294—311.
- [8] Rose Calvin W, Hogarth William L, Ghadiri Hossein, et al. Overland flow to and through a segment of uniform resistance[J]. *J Hydro*, 2002, 255: 134—150.
- [9] Ogunlela A O, Makanjuola M B. Hydraulic roughness of some African grasses[J]. *J Agric Engng Res*, 2000, 75: 221—224.
- [10] Abrahams A D, Parsons A J, Luk S H. Field experiments on the resistance to overland flow on desert hillslopes, 1990,

- IAHS Publication 189, 1—18.
- [11] 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.
- [12] 吴希媛, 张丽萍. 降水再分配受雨强、坡度、覆盖度影响的机理研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 28—30.
- [13] 沈 冰, 李怀恩, 沈 晋. 坡面降雨漫流过程中有效糙率的试验研究[J]. 水利学报, 1994, 10: 61—68.
- [14] 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.
- [15] 李 毅, 邵明安. 雨强对黄土坡面土壤水分入渗及再分布的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2271—2276.
- [16] 赵西宁, 吴普特, 冯 浩, 等. 坡面土壤侵蚀产沙的神经网络模拟[J]. 土壤学报, 2006, 43(2): 324—327.
- [17] 王文龙, 雷阿林, 李占斌, 等. 黄土丘陵区坡面薄层水流侵蚀动力机制实验研究[J]. 水利学报, 2003, 34(9): 66—71.
- [18] 王忆龙, 吴文明, 孙宗胜. 关于水力计算糙率系数确定方法的探讨[J]. 黑龙江水利科技, 1999, 4: 13—14.
- [19] 张志强, 王礼先, 余新晓, 等. 渗透坡面林地地表径流运动的有效糙率研究[J]. 林业科学, 2000, 36(5): 22—27.
- [20] 郑子成, 何淑勤, 吴发启, 等. 地表糙度与水力糙率系数的关系[J]. 山地学报, 2004, 22(6): 236—239.

Hydro-dynamic parameters of overland flow during laboratory rainfall experiments under grass coverage

Li Yi^{1,2}, Shao Ming'an²

- (1. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;
2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, China Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: Laboratory rainfall experiments were performed in order to investigate the variation of hydro-dynamic characteristics of overland flow for 2 typical loess soils under artificial grass coverage. Grass coverage was the major factor and soil texture and rainfall intensity were the minor factors in the analysis. The results showed that, for the same grass coverage, runoff rate and flow velocity both increased when rainfall intensity increased, while runoff rate and flow velocity both decreased when cover age increased. Flow velocity increased when rainfall duration was prolonged, while the curve of flow velocity variation over time was totally elevated when rainfall intensity increased. The curve of flow velocity variation over time was totally degraded when cover increased. Average flow depth decreased with increasing flow velocities. When cover age increased at the same rainfall intensity, Froude number increased, Renolds number decreased and both Darcy-Weisbach and Manning friction coefficients increased correspondingly. At the same grass coverage, when rainfall intensity increased, both the Froude and Renolds number increased, with both Darcy-Weisbach and Manning friction coefficients decreasing correspondingly. Therefore, the hydro-dynamic characteristics were improved, the flow velocities decreased and the friction and roughness increased when the grassland coverage increased.

Key words: grass coverage degree, friction coefficient, flow velocity, rainfall, overland flow