

砒砂岩陡坡面径流水动力学特征

苏涛¹, 张兴昌^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学, 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为研究砒砂岩地区陡坡面径流的侵蚀规律, 为该地区坡面水蚀预报模型的建立提供科学的理论依据, 通过室内模拟冲刷试验, 对不同冲刷流量和坡度的坡面径流水动力学特征进行研究。结果表明: 在试验的冲刷流量和坡度范围内, 砒砂岩坡面径流流速随冲刷流量和坡度的增大而增大, 它们之间呈幂函数关系。径流雷诺数(Re)随冲刷流量的增大而增大, 40° 则是 Re 变化的临界坡度, 此时 Re 最大, 而弗罗德数(Fr)的变化趋势正好相反。当冲刷流量大于 4 L/min 时, 径流流态为紊流和急流, 其余处理坡面径流流态都为层流和急流。径流 Darcy-Weisbach 阻力系数(f)随压实度增大而减小, 随冲刷流量的增大而增大, 60° 则是 f 变化的临界坡度, 此时 f 最大, 且 f 和输沙率有一定的正相关关系。

关键词: 砒砂岩; 坡面侵蚀; 水动力学; 冲刷试验

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2012)01-0017-05

Hydraulic Characteristics of Steep Slope Runoff of Pisha Sandstone

SU Tao¹, ZHANG Xing-chang^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University,

Yangling, Shaanxi 712100; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and

Forestry University, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to study erosion rule of slope runoff and provide scientific and theoretical basis for water erosion forecast model in Pisha sandstone region, the hydrodynamic characteristics of steep slope runoff under the different scouring flow discharges and slope gradients were studied in this paper by using indoor runoff scouring experiment. The results showed that flow velocity of steep slope runoff of Pisha sandstone increased with the increase of scouring flow discharges and slope gradients under the flow discharges and slope gradients of this experiment and there were the power function relationships among runoff velocity and scouring flow discharges and slope gradients. The Reynolds number(Re) of slope runoff increased with scouring flow discharges. The critical slope of changes of Re was 40° and Re was maximum at this point. The Froude number(Fr) of slope flow runoff had the opposite trends. The flow regimes were turbulent flow and supercritical flow when flow discharges was greater than 4 L/min and the flow regimes were all laminar flow and supercritical flow at other treatments. The Darcy-Weisbach drag coefficient(f) of slope runoff increased with scouring flow discharges. The critical slope of changes of f was 60° and f was maximum at this point. The drag coefficient had positive correlation with sediment transport rate.

Key words: Pisha sandstone; slope erosion; hydrodynamics; scouring experiment

在黄河流域的晋陕蒙接壤地区分布着一种被当地人俗称为“砒砂岩”的松散岩层, 由于该岩层极易发生土壤侵蚀现象, 群众深受其水土流失危害, 视其危害毒如砒霜, 故称其为“砒砂岩”。砒砂岩具体是指古生代二叠纪、中生代三叠纪、侏罗纪和白垩纪的厚层砂岩、砂页岩和泥质砂岩组成的岩石互层。包括灰黄、灰白、紫红色等石英砂岩及灰、灰黄、灰紫色的沙质页岩, 紫红色的泥岩、泥沙岩等^[1]。而砒砂岩集中分布的地区就被称为砒砂岩地区, 这一地区土壤侵蚀模数高达 3~4 万 t/(km²·a), 而且其主要产沙物质——砒砂岩是黄河粗沙(直径大于 0.05 mm)的重要来源之一, 其基岩产沙量占总输沙量的 68.5%^[2], 成为黄土高原侵蚀最剧烈、治理难度最大的地区, 被中外专家称为“世界水土流失之最”和“环境癌症”^[3]。为减轻砒砂岩地区水土流失危害, 研究

收稿日期: 2011-08-14

基金项目: 国家“973”计划项目(2007CB106803)

作者简介: 苏涛(1978-), 男, 在读博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持措施方面的研究。E-mail: vincenttao2@163.com

通讯作者: 张兴昌(1965-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持措施方面的研究。E-mail: zhangxc@ms.iswc.ac.cn

砒砂岩地区坡面侵蚀发生过程中的水动力学特性就显得格外重要。已有很多学者对坡面流的水动力学特性进行了大量的研究^[4-8],但是还未见到有关砒砂岩地区陡坡面径流水动力学特性的研究结果。与缓坡相比,陡坡条件下的水动力特性和侵蚀特征具有其特殊性^[9],研究砒砂岩地区陡坡条件下径流水动力学特征,对于分析该地区陡坡侵蚀动力机制、泥沙输移特征、建立土壤侵蚀模型等诸多领域具有重要的理论意义。本研究通过在砒砂岩集中分布的地区采集黄绿色砒砂岩风化土样,采用室内放水冲刷试验,研究不同陡坡条件下不同压实度和冲刷流量径流水动力学特征的变化规律,进一步揭示了砒砂岩陡坡面径流侵蚀产流产沙机理和侵蚀动力学机制,研究结果可为该地区土壤侵蚀模型的建立、坡面水土流失控制和水土保持合理规划提供重要的理论依据。

1 试验设计与方法

1.1 采样点概况

采样地点选在内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗准格尔召镇(又名西召镇)西召沟内,具体地理坐标为 E110°07'40.6",N39°36'32.3",海拔 1 350 m。该点地处鄂尔多斯高原中东部,年平均气温 7.3℃,≥10℃积温为 3 400℃,太阳总辐射量为 599 kJ/(cm²·a),年蒸发量为 2 100~3 700 mm,降水量年际变化大,且多以暴雨形式出现,主要集中在 7—8 月份,根据西召沟流域测点 1995—1999 年连续观测平均汛期降雨量为 263.0 mm,平均风速为 12.3 m/s。采样点为典型的砒砂岩地貌,砒砂岩层由灰白、黄绿、紫红、红棕、黄褐色等不同颜色的砂粒构成,层状结构,组织松散,厚度在 100~300 m 之间,粗沙(粒径≥0.05 mm)含量约 80%;有黄土覆盖层的砒砂岩区黄土厚度多不足 50 cm,平均厚度为 10 cm 左右^[10]。

1.2 试验设计

1.2.1 试验装置 室内模拟放水冲刷试验于 2010 年 7—10 月在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀人工模拟降雨大厅内进行。试验装置系统由位于坡面上部的供水设备和位于坡面下部的试验土槽组成。试验土槽为可调坡钢质冲刷槽,土槽大小为 2 m(长)×0.5 m(宽)×0.5 m(高),底部钻有规则的小孔,坡度调节范围为 30°~70°。土槽下端设有出水口,盛接径流量和土壤侵蚀量。坡度由吊链调节,用吊链将土槽吊起,调节土槽到试验所需坡度并进行固定。供水设备主要由安置在试验土槽顶端 5 m

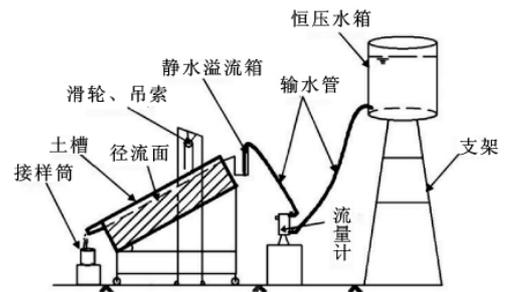


图 1 冲刷试验装置示意图

高处恒定水位的贮水箱、控制阀门、输水软管、流量计和静水溢流箱组成,静水溢流箱与冲刷槽顶部相连,出水口与试验土槽顶端在同一水平面上,试验装置如图 1 所示。

1.2.2 试验设计 冲刷试验设计 2 个因素,分别为冲刷流量(2,3,4,5 L/min)和坡度(30°,40°,50°,60°和 70°),采用单因素试验设计,当冲刷流量因子为变量时,坡度为 30°;当坡度因子为变量时,冲刷流量为 2 L/min,每次试验 2 次重复。试验土壤为在采样点采集的黄绿色砒砂岩风化土壤,其机械组成为:颗粒粒径 0~0.002 mm 的质量分数为 7.443%,颗粒粒径 0.002~0.020 mm 的质量分数为 10.113%,颗粒粒径 0.020~2.000 mm 的质量分数为 82.444%,土壤类别为砂质壤土。试验土样风干过 1 cm 筛后,按土壤最优含水量配制土样,填土厚度为 40 cm,将土料分层(每隔 5 cm)填入冲刷槽内,边装边均匀夯实。在静水溢流箱下面铺上透水纱布,防止出水口土壤表面由于水流的冲刷而过度侵蚀,造成试验误差增大。试验开始前先将试验土槽用吊链吊起,调节至所需坡度固定,贮水箱高于土槽顶端 5 m 处,将输水软管放入坡面上部的溢流槽,通过阀门和流量计按设计流量向溢流箱放水,通过溢流箱的缓冲,保证坡面的水流是以薄层水流的形式进入坡面试验土槽,均匀向下流动,模拟自然坡面汇水过程。试验开始后,在土槽出口处收集径流泥沙样,以计算坡面径流泥沙过程,记录产流时间,产流后每隔 1 min 取 1 次径流泥沙样。坡面流速测定采用高锰酸钾染色剂示踪法,产流 2 min 后每隔 3 min 测 1 次流速,取 3 个测量值的平均值再乘以不同的修正系数,就得到层流、过渡流和紊流的坡面平均流速,修正系数采用 Abrahams^[11]的研究结果(层流的修正系数为 0.67,过渡流的系数为 0.70,紊流的系数为 0.80)。测流速的同时用钢尺分别测量距小区顶端 20,80,150 cm 处的过水断面宽度,然后求其平均值就是该冲刷小区的平均过水宽度,试验时间为 30 min。每次试验结束后,称量泥水样,将径流泥沙沉淀后,烘干称量泥沙量以计算产流和产沙量。试验开始和结束分别用温度计测量溢流槽中水的温度,然后取平均值以计算水动力粘滞系数。

1.3 分析方法^[12]

径流雷诺数 (Re) 是判断水流运动型态重要指标。 $Re = uR/\nu$, $\nu = 0.000017779/(1 + 0.03368t + 0.000221t^2)$ 。

式中: u 为断面平均流速 (m/s); R 为水力半径 (m), $R = hb/(b + 2h)$, b 为过水断面宽度 (m), h 为断面平均水深 (m), $h = Q/(ubT)$, Q 为 T 时间内径流量 (m^3), T 为径流取样间隔时间 (s); ν 为水动力粘滞系数 (m^2/s); t 为水温 ($^{\circ}C$)。

径流弗罗德数 (Fr) 是判断水流流态的重要指标, $Fr = u/\sqrt{gh}$ 。其中: g 为重力加速度 ($9.8 m/s^2$)。

径流 Darcy-Weisbach 阻力系数 (f) $= 8gRJ/u^2$ 。其中: J 为水力坡度, 可用坡度的正弦值代替。

2 结果与分析

迄今为止, 研究坡面和细沟发生、发育时仍借鉴河流水动力学理论, 用坡面径流流速、雷诺数 (Re)、弗罗德数 (Fr) 和 Darcy-Weisbach 阻力系数 (f) 等特征值表示坡面径流的水动力学参数。

2.1 径流流速分析

径流流速是坡面径流最重要水力学要素之一, 是径流对坡面土壤产生侵蚀的直接动力^[13]。本试验重点探讨压实度、冲刷流量和坡度对流速影响。表 1 描述的是不同冲刷流量和坡度下的径流流速。

表 1 不同压实度、冲刷流量和坡度下的径流流速

冲刷流量/(L·min ⁻¹)	2	3	4	5	2	2	2	2	2
坡度/($^{\circ}$)	30	30	30	30	30	40	50	60	70
单宽流量/(m ³ ·min ⁻¹ ·m ⁻¹)	0.005	0.020	0.033	0.062	0.005	0.006	0.006	0.006	0.006
径流流速/(m·min ⁻¹)	15.1	17.5	19.3	22.0	13.7	15.2	15.6	17.1	18.5

2.1.1 冲刷流量对径流流速的影响 由表 1 可知, 冲刷流量增大, 单宽流量随之增大, 径流流速也明显增大。当冲刷流量为 2 L/min 时, 单宽流量为 0.005 m³/(min·m), 径流流速为 15.1 m/min; 当冲刷流量增大到 3 L/min 时, 单宽流量为 0.020 m³/(min·m), 径流流速为 17.5 m/min; 当冲刷流量增大到 4 L/min 时, 单宽流量为 0.033 m³/(min·m), 径流流速为 19.3 m/min; 当冲刷流量增大到 5 L/min 时, 单宽流量为 0.062 m³/(min·m), 径流流速增大到 22.0 m/min。显然随着冲刷流量和单宽流量的增大, 使得径流在沿坡面流动时获得更大的动能, 进而径流流速增大。进一步分析得出, 径流流速与单宽流量之间呈幂函数关系, 这和很多学者的研究结果^[5-6]类似, 其具体关系公式为: $u = 32.433q^{0.1479}$, $R^2 = 0.9865$ 。式中: u 为径流流速 (m/min); q 为单宽流量 (m³/(min·m))。

2.1.2 坡度对径流流速的影响 由表 1 还可知, 随坡度增大, 径流流速也有逐渐增大的趋势。当坡度为 30 $^{\circ}$ 时, 径流流速为 13.7 m/min, 当坡度增大到 40 $^{\circ}$, 50 $^{\circ}$, 60 $^{\circ}$ 和 70 $^{\circ}$ 时, 径流流速分别增大到 15.2, 15.6, 17.1, 18.5 m/min, 分别比 30 $^{\circ}$ 时增大了 10.9%, 13.9%, 24.8% 和 35.0%。可见, 坡度越陡坡面径流向下流动的势能越大, 同时在坡面上流动时转化的动能也就越多, 所以径流流速也就越大。同样, 经过进一步分析得出, 径流流速和坡度也呈幂函数关系^[6], 其关系公式为: $u = 4.3277s^{0.3370}$, $R^2 = 0.9607$ 。式中: u 为径流流速 (m/min); s 为坡度 ($^{\circ}$)。

2.2 径流流态分析

径流流态是表征坡面水流动力学特性的基本参数, 它与坡面径流计算和输沙演算直接相关^[14]。一般是根据对径流雷诺数 (Re) 和弗罗德数 (Fr) 数值大小来判断径流的流态。在河流动力学中, Re 反映了径流惯性和粘滞力的比值, 其中径流惯性力起着扰动水体, 使其脱离规则运动的作用, 粘滞力则削弱、阻滞这种扰动并使水流保持原有规则运动的作用^[14]。根据明渠均匀流的基本理论, 层流和紊流的界限 Re 对于矩形断面的明渠水流大致在 500 左右, Re 大于 500, 属于紊流; 小于 500 则属于层流; 在 500 左右属于过渡流。另外, 在河流动力学中, Fr 反映了水流惯性和重力之比, 它综合地反映了流速和径流深的对比关系。在径流流量相同的情况下, Fr 越大, 说明径流挟沙能力越强和坡面的径流剪切力越大。另外根据明槽水流的判别标准, $Fr \geq 1$, 说明坡面流态是急流, $Fr < 1$ 则属于缓流^[5]。

2.2.1 冲刷流量对径流流态的影响 不同冲刷流量下径流 Re 和 Fr 随冲刷历时的变化见图 2。由图 2 可知, 坡面径流 Re 随着冲刷流量的增大而增大, 而 Fr 有随着冲刷流量的增大而减小的趋势。当流量为 2 L/min 时, Re 在 66.0~129.5 之间变化, 平均值为 85.2, Fr 在 2.53~7.06 之间变化, 平均值为 4.45; 当流量为 3 L/min 时, Re 在 106.7~488.6 之间变化, 平均值为 327.5, Fr 在 1.41~4.18 之间变化, 平均值为 2.64; 当流量为 4 L/min 时, Re 在 353.3~584.1 之间变化, 平均值为 519.7, Fr 在 1.70~3.26 之间变化, 平均值为 2.52; 当

流量增大到 5 L/min 时, Re 的变化范围为 394.1~1 195.5, 平均值为 914.1, Fr 的变化范围为 1.30~3.46, 平均值为 2.35。和压实度的影响一样, 径流 Re 随着冲刷历时的延长有波动增大的趋势, 而 Fr 却有波动减小的趋势。当冲刷流量较小(2 L/min 和 3 L/min)时, 坡面径流的流态为层流, 当冲刷流量大于 4 L/min 时, 绝大部分时间的流态为紊流; 在本试验设计的冲刷流量下, 坡面径流的流态都为急流。

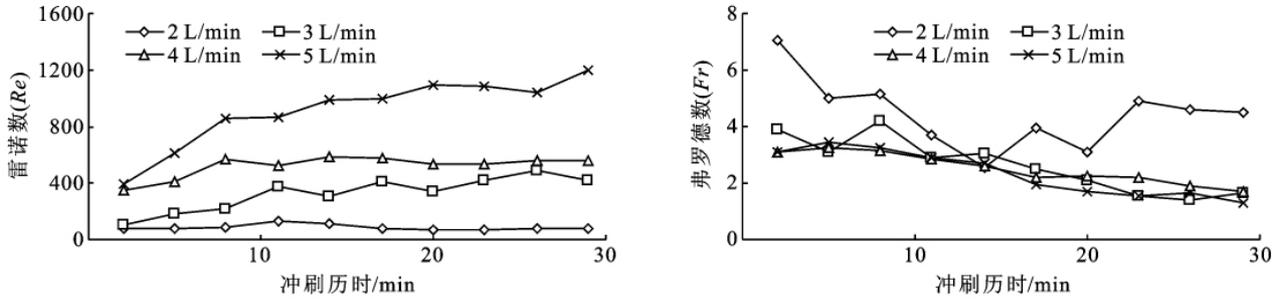


图 2 不同冲刷流量下径流 Re 和 Fr 随冲刷历时的变化

2.2.2 坡度对径流流态的影响 将不同坡度的径流 Re 和 Fr 随冲刷历时的变化数据绘于图 3。由图 3 可知, 坡度对径流流态的影响要比其他 2 个因素的影响复杂。当坡度较小(30°)时, Re 在 60.0~129.5 之间变化, Fr 在 2.53~7.06 之间变化。当坡度增大到 40° 时, Re 也增大, 在 96.2~305.6 之间变化, Fr 减小, 在 1.48~5.69 之间变化。但是当坡度大于 50° 时, Re 有减小的趋势, 而 Fr 有增大的趋势。坡度为 50° 时, Re 在 61.6~289.5 之间变化, Fr 在 2.16~6.11 之间变化; 坡度为 60° 时, Re 在 78.8~232.0 之间变化, Fr 在 2.77~6.22 之间变化; 坡度为 70° 时, Re 在 49.3~176.5 之间变化, Fr 在 3.47~9.76 之间变化。显然, 40° 为径流流态变化的临界坡度, 此时径流 Re 最大, 而 Fr 最小, 这和前人的研究结果不同, 有研究表明径流 Fr 随着坡度的增大而增大^[15], 这可能是本次试验选用的坡度处理较大的缘故。径流 Re 随冲刷历时的增大有先增大后减小的趋势, Fr 则随冲刷历时的增大有波动减小的趋势。在本试验设计的坡度下, 坡面径流的流态都为层流和急流。

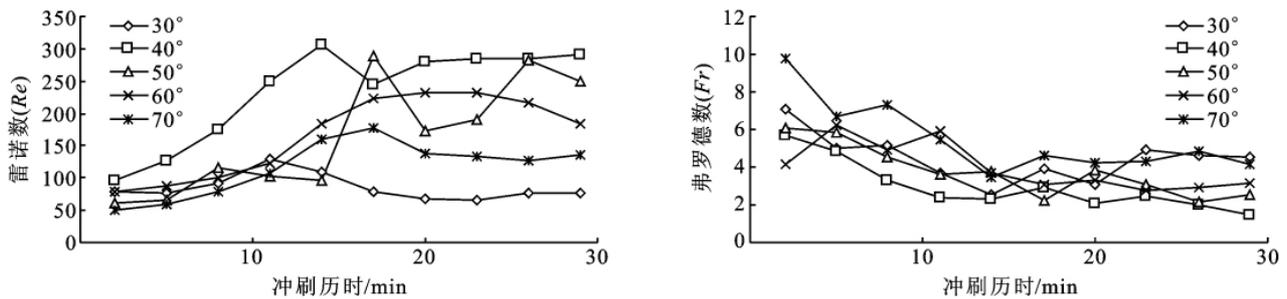


图 3 不同坡度下径流 Re 和 Fr 随冲刷历时的变化

2.3 径流阻力分析

径流在坡面上形成后, 必然要受到阻力作用, 其大小不仅直接影响径流速度, 而且还与土壤的有效侵蚀力有很大关系^[14]。径流阻力主要来自 3 个方面: ①沙粒本身对水流的阻碍作用; ②沟槽形态对水流的阻碍作用; ③水流所挟带泥沙的影响^[6]。目前, Darcy-Weisbach 阻力系数(f)是普遍采用反映河渠水流阻力特征的水力参数, 也是坡面径流水动力学基本参数之一。该阻力系数能反映坡面径流在流动过程中所受到的阻力大小^[13]。

表 2 不同冲刷流量和坡度下 f 与输沙率之间的关系

冲刷流量/(L·min ⁻¹)	2	3	4	5	2	2	2	2	2
坡度/(°)	30	30	30	30	30	40	50	60	70
阻力系数(f)	0.25	0.62	0.70	0.91	0.25	0.53	0.60	0.88	0.32
输沙率/(g·m ⁻² ·min ⁻¹)	454.3	839.8	1281.1	1519.2	454.3	804.7	1160.7	1427.2	1412.3

2.3.1 冲刷流量对 f 的影响 不同冲刷流量和坡度下径流 f 和输沙率之间的关系见表 2。由表 2 可知, 径流阻力系数(f)和输沙率都随着冲刷流量的增大而增大。有研究表明, 在流量、坡度等水动力条件相同的情况下, f 越大, 径流克服阻力所消耗的能量越多, 则径流用于侵蚀和泥沙输移的能量越小, 土壤侵蚀就越微弱, 反之则土壤侵蚀剧烈^[6]。显然, 这和本试验所得结论相左, 笔者分析这可能有 2 个原因: 一是本试验所选坡度最小都是 30° , 而以往不管是冲刷试验还是降雨试验所选坡度都较小; 二就是本试验所选用土样是砗砂岩风化

物,与前人所用土样也不同,但究竟是何原因还需要进一步研究。

2.3.2 坡度对阻力系数(f)的影响 由表2还可知,坡度对阻力系数和输沙率的影响相对复杂,当坡度小于 60° 时,径流阻力系数和输沙率随着坡度的增大而增大;当坡度大于 60° 时,径流阻力系数随着坡度的增大急剧减小,而径流输沙率也有减小的趋势。但不管是不同冲刷流量还是坡度下,径流阻力系数和输沙率都呈现一种正相关的变化趋势。

3 结论

(1)通过室内模拟冲刷试验,结果表明砒砂岩坡面径流流速随着冲刷流量和坡度的增大而增大,而且它们之间呈幂函数关系。

(2)在本试验设计的冲刷流量和坡度范围内,砒砂岩坡面径流雷诺数(Re)在49.3~1 195.5之间变化,弗罗德数(Fr)在0.69~9.76之间变化。当冲刷流量较小(2 L/min和3 L/min)时,径流流态为层流和急流,冲刷流量大于4 L/min时,径流流态为紊流和急流。在不同的坡度下径流流态都为层流和急流。 Re 随冲刷流量的增大而增大, 40° 则是 Re 变化的临界坡度,此时 Re 最大。而 Fr 的变化趋势和 Re 的正好相反。在不同的冲刷流量和坡度下, Re 有随冲刷的进行而逐渐增大的波动变化趋势, Fr 则随冲刷历时的增大而减小。

(3)砒砂岩坡面径流 Darcy-Weisbach 阻力系数(f)随冲刷流量的增大而增大, 60° 则是 f 的临界坡度,此时 f 最大,且 f 和输沙率有一定的正相关关系。

参考文献:

- [1] 叶浩,石建省,侯宏冰,等. 内蒙古南部砒砂岩岩性特征对重力侵蚀的影响[J]. 干旱区研究,2008,25(3):402-405.
- [2] 张平仓,刘玉民,张仲子. 皇甫川流域侵蚀产沙特征及成因分析[J]. 水土保持通报,1992,12(2):15-24.
- [3] 王愿昌,吴永红,寇权,等. 砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J]. 中国水土保持科学,2007,5(1):14-18.
- [4] 赵小娥,魏琳,曹叔尤,等. 强降雨条件下坡面流的水动力学特性研究[J]. 水土保持学报,2009,23(6):45-47,107.
- [5] 吴淑芳,吴普特,原立峰. 坡面径流调控薄层水流水力学特性试验[J]. 农业工程学报,2010,26(3):14-19.
- [6] 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.
- [7] 丁文峰,李亚龙,王一峰,等. 人工模拟降雨条件下紫色土坡面流水动力学参数特征[J]. 水土保持学报,2010,24(2):66-69.
- [8] 龚家国,周祖昊,贾仰文,等. 黄土区浅沟侵蚀沟槽发育及其水流水力学基本特性模拟实验研究[J]. 水土保持学报,2010,24(5):93-96,100.
- [9] Grosh J L, Jarrett A R. Interrill erosion and runoff on very steep slopes[J]. Trans. of the ASAE,1994,37(4):1127-1133.
- [10] 李怀恩,同新奇,张康,等. 沙棘“柔性坝”对土壤水分调控作用的试验研究[J]. 农业工程学报,2006,22(11):69-73.
- [11] Abrahams A D, Parsons A J, Luk S H. Resistance to overland flow on desert hillslopes[J]. Journal of Hydrology,1986,88:343-363.
- [12] 吕文舫. 水力学[M]. 上海:同济大学出版社,1995:23-64.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 潘成忠,上官周平. 不同坡度草地含沙水流水力学特性及其拦沙机理[J]. 水科学进展,2007,18(4):490-495.