
* 试验研究 *

非硬化路面与原生地面侵蚀水动力参数对比研究

詹松¹, 王文龙^{2,3}, 黄鹏飞⁴, 李宏伟⁵, 李建明³, 王贞⁶, 罗婷⁷

(1. 西北农林科技大学 资源与环境学院, 陕西 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, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 江西省水土保持科学研究院 土壤侵蚀与防治重点实验室, 江西 南昌 330029; 5. 浙江省水利水电勘测设计院, 浙江 杭州; 6. 中国水电顾问集团 华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014; 7. 杭州大地科技有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 非硬化路面是神府煤田重要的侵蚀单元,其侵蚀过程和方式与原生地面存在一定差别。通过野外人工模拟降雨试验,对比分析了非硬化路面和原生地面水沙响应的过程和机制。结果表明:(1)非硬化路面径流主要为过渡流,原生地面主要为层流,且均为缓流;(2)非硬化路面水流流速、剪切力、佛汝德数、雷诺数、功率大于原生地面,曼宁系数、达西系数小于原生地面;(3)非硬化路面水力参数随坡度、雨强变化趋势与原生地面不完全一致;(4)非硬化路面产沙量随径流量增大,原生地面产沙量为非硬化路面的0.8%~14%;(5)非硬化路面侵蚀模数对水动力参数响应紧密程度表现为:径流总动能>平均水流功率>平均水流剪切力。

关键词: 神府煤田; 水动力参数; 人工模拟降雨试验; 非硬化路面; 原生地面

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)02-0001-06

中图分类号: S157.1

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.02.001

Comparative Analysis of Hydrodynamic Parameters for Unpaved Road and Original Ground

ZHAN Song¹, WANG Wen-long^{2,3}, HUANG Peng-fei⁴,

LI Hong-wei⁵, LI Jian-ming³, WANG Zhen⁶, LUO Ting⁷

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS, MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Key Laboratory of Soil Erosion and Control, Jiangxi Provincial Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang, Jiangxi 330029, China; 5. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou, Zhejiang 310014, China; 6. Hydrochina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou, Zhejiang 310014, China; 7. Hangzhou Earth Science and Technology Co., LTD, Hangzhou, Zhejiang 310000, China)

Abstract: Erosion processes and modes may be changed on unpaved road formed by rolling original ground. The objective of this study was to reveal the changing mechanisms of water and sediment yield by a series of outdoor artificial rainfall simulation experiments in Shenfu coalfield. Results show that: (1) Flow regime is mainly the transitional flow on unpaved road and the laminar flow on original ground, and both of them are the subcritical flow. (2) Reynolds number, shear force, Froude number, flow velocity and stream power on unpaved road are higher than those on original ground, while the Darcy—Weisbach friction coefficient and the Manning roughness coefficient on unpaved road are lower than those on original ground. (3) Hydrodynamic parameters on unpaved roads are not absolutely consistent with those on original ground. (4) Sediment yield on original ground is lower than that on unpaved road and increased as runoff yield increases. (5) Correlation coefficients for the responsive relationships between sheet erosion rate and hydrodynamic parameters on unpaved road are in the following order: runoff kinetic energy>mean stream power>mean flow shear stress.

Keywords: Shenfu coalfield; hydrodynamics parameter; artificial rainfall simulation experiment; unpaved road; original ground

收稿日期: 2013-05-14

修回日期: 2013-05-22

资助项目: 国家自然科学基金项目“煤矿开发建设中人为侵蚀机理及新增水土流失预报模型: 以神府东胜煤田为例”(40771127); 水利部公益性行业专项(201201048; 201201047); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室专项(10502-T1)

作者简介: 詹松(1987—), 男(汉族), 四川省遂宁县人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: zs277428100@163.com。

通信作者: 王文龙(1964—), 男(汉族), 陕西省大荔县人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: wllwang@nwsuaf.edu.cn。

道路是土地利用方式之一,道路的形成实际是对原始地貌环境进行改造的过程。道路使原地面地形地貌、地表植被等发生改变,相关物理性质也发生较大变化,自然降雨作用下,其土壤侵蚀过程和方式与农耕地有所不同^[1]。国外学者^[2]较早已开始了道路侵蚀研究,认为道路侵蚀是河流泥沙来源之一。道路形成后,经过不断碾压,入渗率降低,径流系数增大,排水系统密度往往较其它下垫面大,道路因易于汇水而常常在其周围冲刷成沟头,据调查,高达 58% 公路通常直接或间接与河流相接,而公路周围形成的沟道是主要连接方式之一^[3]。随着道路侵蚀研究的不断深入,针对不同的公路、铁路、林区和矿区等非硬化和硬化道路,学者们^[4]从不同类型道路侵蚀过程、防护措施、防护效益展开了一系列研究,普遍认为道路侵蚀可以使流域产沙量增加,而采取适当的防护措施可以有效减少道路产生的泥沙量。

由于道路类型复杂多样,因而道路侵蚀预测研究一直以来进展缓慢,还无法对道路侵蚀进行有效地估算,其原因主要是对相关机理的认识还不够深入,国内研究主要对产流产沙和防护措施效益进行相关的探讨。王贞^[5]采用野外放水冲刷试验分析了非硬化路面产流产沙特征。崔欢虎^[6]探讨了不同下垫面产流特征,认为道路径流损失可达 80% 以上。田凤霞、刘刚、郑世清等^[7-9]分别通过室内人工降雨或放水冲刷试验探讨了不同雨强,不同坡度和不同植被覆盖度下植物路产流产沙过程和水动力学特征,认为水力学特征受植物路盖度影响较大。曹世雄等^[10]通过在农田田间路面多年种植牧草并进行定点监测后认为其侵蚀量可减少 54%~78%,并有助于当地景观生态的恢复。

综上所述,有关道路的研究主要集中在探讨路面的产流产沙特征,而对水力学特征及其相关响应关系研究较少,特别是在开发建设项目中,煤矿区非硬化

路面的研究显得更为薄弱。为加强矿区非硬化路面机理的深入探讨,通过野外人工模拟降雨试验对比分析非硬化路面与原生地面的产流产沙、水动力参数变化特征及其响应关系,为矿区非硬化道路水土流失的预测与治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文研究地点为神府东胜矿区。该区位于陕西府谷县西部、神木县北部和内蒙古自治区鄂尔多斯(伊克昭盟)的南部,内有乌兰木伦河和窟野河流经(108°36′—110°45′E,37°20′—39°30′N),属于水蚀风蚀交错区。该区属于干旱、半干旱大陆季风气候区,年降雨量约在 194.7~530.5 mm,年际变化较大,且年内分布不均,多暴雨,多集中在夏、秋季,蒸发量约为降雨量的 5 倍。土壤以黄土和风沙土为主,结构松散,抗蚀性差,植被覆盖率低。受大风和暴雨影响,水土流失严重,年平均侵蚀模数达 1.5×10^4 t/(km²·a),易发生滑坡、崩塌等自然灾害。

1.2 下垫面条件

试验于 2010 年 8—9 月在神东煤田区神木县西沟乡六道沟村一块撂荒地进行,该地地表植被覆盖度相近,原生地面小区保持同一坡度内地面平整并不做任何处理。非硬化路面是在原生地面上经过不断地碾压而形成的,地表植被不复存在,地面硬度和强度都大于原生地面,采用控制土壤密度的方法人工构筑非硬化路面,先测算多条实际非硬化路面土壤密度范围(1.60~1.70 g/cm³),然后用铁锹翻动原生地面 20 cm 深并除去植被,整平后洒水夯实,并分 3 次分别覆土 3~5 cm 厚度,前两次洒水夯实,最后一次夯实不洒水并用环刀法测土壤密度(控制在 1.70 g/cm³ 左右),TDR 测土壤含水量,达到要求后即可准备试验。通过过筛分析,试验地土壤机械组成详见表 1^[5]。

表 1 试验地土体物理特性

下垫面	土壤类型	土壤密度/(g·cm ⁻³)	各级颗粒(mm)机械组成						
			<0.010	0.05~0.01	0.10~0.05	0.25~0.10	0.5~0.25	1.0~0.5	2~1
原生地面	沙黄土	1.49~1.53							
非硬化		1.60~1.71	10.00%	14.98%	18.88%	26.56%	23.21%	5.25%	2.12%

1.3 试验小区布设

试验小区长宽为 3 m×1 m,四周用 40 cm 宽、1 mm 厚的钢板插入地下 25 cm,地表出露 15 cm,为防止边缘效应,小区周围 10 cm 内处理与小区内相同,小区下端设置集流槽。降雨设施采用 12 根 6 m、20 根 3 m 的 6 mm 钢管搭设 3 m 高的降雨架,并用防

风布包围四周以防止风对降雨的影响。为保证降雨雨滴达到自然降雨终点速度,试验采用有压供水,即利用潜水泵供水从小区旁 8 m 高处的蓄水箱内直接给降雨喷头供水,通过压力表和阀门控制降雨强度。由于试验地形条件限制,原生地面选择坡度为 5°,10°和 18°,非硬化路面坡度为 3°,6°,9°和 12°,初始降雨

强度都设置为 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 和 3.0 mm/min(数据处理时以实际量测为准)。

试验开始前用塑料布盖住试验小区,用量筒呈梅花形测定 1 min 内降雨量,即降雨强度,并采用克里斯琴森系数 CU 计算降雨均匀度。雨强达到要求后,揭开小区遮盖的塑料布并开始记录产流时间,开始产流时记下产流时间并接取径流泥沙样,测定水深、径流宽和流速等数据。产流后前 3 min 内每分钟用取样桶接取一次泥沙样,高锰酸钾示踪法在同一断面不同水流位置测定 3 次流速(观测段为 2 m),测针法测同一断面水深 3 次和尺子测径流宽 3 次。产流 3 min 后,每 3 min 重复一次上述过程。单次降雨时间总计 45 min(产流时间除外),并采用比重瓶法获取径流含沙量。

1.4 数据计算

降雨形成的径流是引起土壤侵蚀的主要动力,对径流的相关水力参数进行计算有助于深入揭示非硬化路面产沙的本质。运用水力学相关理论和方法对径流流速(V)、雷诺数(R_e)、弗劳德数(F_r)、曼宁系数(n)、Darcy—Weisbach 阻力系数、水流剪切力(τ)、水流功率(ω)等水力指标进行了计算。

雷诺数(R_e)是水流惯性力与黏粘滞力的比值,是判定水流流态的重要依据。 $R_e < 500$ 时,水流为层流; $R_e > 2\,000$ 时,流水为紊流,计算公式为:

$$R_e = 4VR/v_m \quad (1)$$

式中: V ——径流流速(m/s); R ——水力半径(m); V_m ——含沙水流运动黏滞性系数

$$V_m = \frac{V_0}{1 - \frac{S_v}{2\sqrt{d_{50}}}} \quad (2)$$

式中: S_v ——体积含沙量百分数; d_{50} ——悬沙(试验上用)的中值粒径(mm); V_0 ——运动黏滞系数(m^2/s),其值根据所测水温查水力学表得到。

弗劳德数 F_r 是水流惯性力与重力的比值。如果 $F_r < 1$,水流为缓流; $F_r \geq 1$ 为急流。计算公式为:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gR}} \quad (3)$$

式中: g ——重力加速度,取值 9.8 m/s^2 。

曼宁系数 n 和达西阻力系数 f 反映了下垫面对水流阻力作用,计算式为:

$$n = \frac{h^{2/3} J^{1/2}}{V}; \quad f = \frac{8gRJ}{V^2} \quad (4)$$

式中: J ——水流能坡,近似为坡度正切值; h ——水流深度(m)。

水流剪切力 τ 反映径流对土壤的剥蚀能力,计算

公式为:

$$\tau = \rho g R J = \gamma R J \quad (5)$$

式中: g ——含沙水的密度(g/cm^3)。

水流功率(ω)反映了一定高度的水体所具有的势能,为单位面积水体势能随时间的变化率,计算公式为:

$$\omega = \gamma h V J = \tau V \quad (6)$$

2 结果与分析

2.1 原生地面与非硬化路面水力参数比较

2.1.1 流速比较 坡面径流流速是反映下垫面物理性质的重要水力参数,也是计算其它水力参数的基础。在不同坡度、雨强和下垫面等组合处理中,以测得的流速作为各时段平均流速,并对相对稳定后的流速取平均值作为全时段的平均流速,根据雨强、坡度绘制流速变化关系图(图 1)。如图 1 所示,非硬化路面在不同坡度不同流量下的流速均明显大于原生地面流速,主要是原生地面有植被覆盖,增大了地表阻力系数,径流随坡面流动过程中受植被阻挡,流速相对变缓,而非硬化路面缺乏植被阻碍,流速较大,流速范围为 $0.13 \sim 0.25\text{ m/s}$,最大流速值较刘刚、田凤霞等^[7-8]裸露土质路面流速偏大,但都在同一个数量级,主要受土壤密度差异影响。两下垫面相近坡度(3° 与 5° , 5° 与 6° , 10° 与 9° , 12° 与 10°)进行流速比较发现,相同降雨强度下,非硬化路面流速是原生地面的 $2.2 \sim 4.2$ 倍,且较稳定,可认为相同条件下,两者的流速比值为—常数,该值不随坡度、雨强而发生较大变化,表明现有采用流量和坡度而不考虑下垫面影响推求流速的方法是可行的。非硬化路面和原生地面流速随雨强增大而增大,但变化趋势有所不同。原生地面变化平缓,可用二次函数进行模拟:

$$V = aI^2 + bI + c \quad (7)$$

式中: V ——流速; I ——雨强; a, b, c ——常数。

对 2 mm/min 雨强、 10° 坡度条件下流速修正后模拟表明,各坡度下,决定系数达到 0.91 以上。非硬化路面流速随雨强变化波动较大,随坡度增大,波动幅度越大,主要是在坡面下部可见细沟、切沟等,由此产生跌水耗能而影响径流流速。而坡度对流速的变化不显著,这与 Nearing^[11] 结论相似。

2.1.2 水力参数随坡度、雨强变化特点对比 根据稳定后平均流速、水深等相关参数和公式计算获取水流剪切力(t)、功率(ω)、弗劳德数(F_r)、雷诺数(R_e)等水力参数,结果如图 2 所示。

水流剪切力和水流功率是反映径流对土壤剥蚀能力的一组水力参数,由图 2 可知,同一下垫面水流

剪切力和水流功率随坡度和雨强的增大而增大。在坡度较大时,非硬化路面水流剪切力随雨强先增大后减小,但减小幅度较小,原因是在小雨强下,坡面流以薄层水流运动,随着雨强的增大,水流形态发生变化,出现滚波流^[12],水流水深不断变化而不稳定,而水面宽度则有所增加,但坡面流不同于明渠水流,水深和水宽数值都较小,在一定范围内,水力半径会有所减小,从而使剪切力偏小。在相近坡度下,非硬化路面水流剪切力和水流功率分别比原生地面增大了 0.4~9 倍,0.8~20 倍,雨强越大,增大倍数越小。

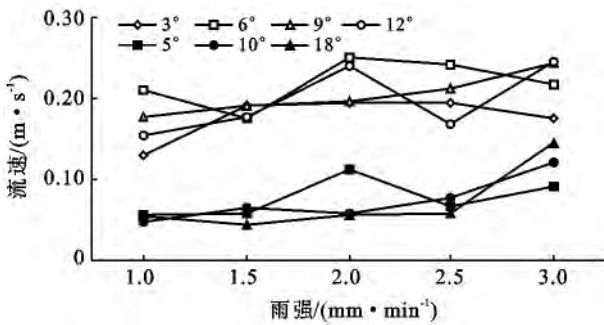


图 1 流速随坡度和雨强的变化

试验中, F_r 均小于 1, 表明水流为缓流, F_r 越小, 水流流动越缓慢。在同一雨强相近坡度试验中, 非硬化路面 F_r 均大于原生地面(包括 18° 坡面), 平均增大了 66%。非硬化路面 R_c 均大于 500, 甚至大于 2 000, 即多数情况下流态属于过渡流, 少数为紊流, 并随雨强增大有增大趋势。原生地面 R_c 绝大部分情况下在 34~400 之间, 小雨强时低于 100, 仅在大雨强大坡度时超过 1 000, 因此原生地面流态基本为缓流。

非硬化路面和原始路面达西阻力系数、曼宁系数均随坡度增大而增大, 但非硬化路面达西阻力系数变化幅度比原生地面小。非硬化路面达西阻力系数随雨强变化不明显, 而原生地面随着雨强的增大先增大后减小。非硬化路面曼宁系数是原生地面的 10.9%~53.5%, 雨强较小时, 非硬化路面曼宁系数大于原生地面, 随着雨强的增大而发生波动, 雨强较大时非硬化路面曼宁系数低于原生地面, 即小雨强时与田凤霞植物路曼宁系数比土质路大的结论有出入^[7], 可能是小雨强时原生地面受植被影响径流水深比非硬化路面小。

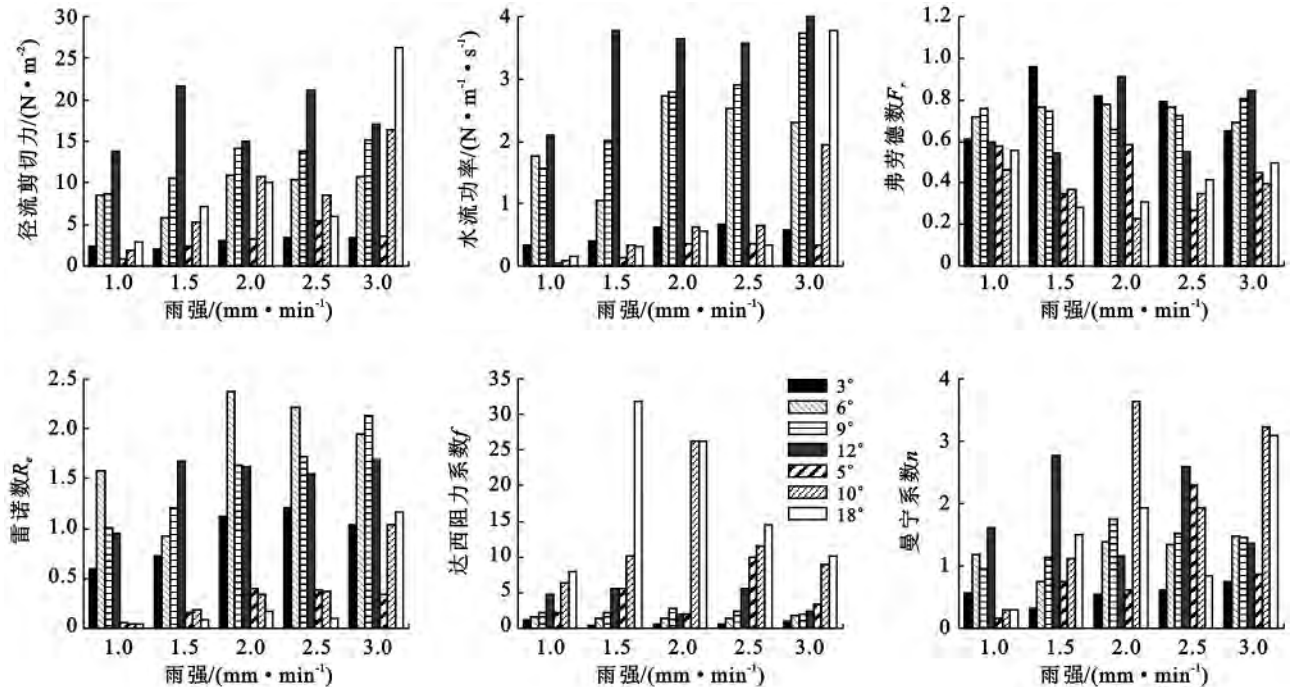


图 2 原生地面(5°, 10°, 18°)与非硬化路面(3°, 6°, 9°, 12°)水力参数变化

2.2 非硬化路面产沙分析

2.2.1 产沙量和径流量关系对比分析 非硬化路面属于土质路面, 是原生地面经过人畜和车辆碾压后形成的。其物理性质与原生地面有较大区别, 路面的产沙量也随着物理特性的改变而相应发生改变。产沙

量与径流量关系如图 3 所示, 非硬化路面产沙量随径流增大明显, 坡度和径流量越大, 产沙量也越大, 产沙量上升趋势明显, 产沙量和径流量关系式为:

$$M = aQ^n \tag{8}$$

式中: M ——产沙量; Q ——径流量; a, n ——常数。

原生地面产沙量 ($M_{\text{原生}}$) 明显比非硬化路面产沙量 $M_{\text{非硬}}$ 少, 最大值不超过 5 kg, 相近坡度不同流量下仅为非硬化路面的 0.8%~14%, 产沙量随径流的变化关系同样可用幂函数进行模拟, 决定系数在 0.94 以上, 但参数 a 比非硬化路面低 3 个数量级。

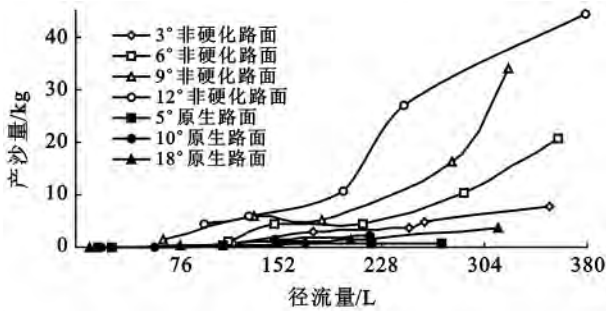


图 3 原生地面与非硬化路面产沙量与径流量关系

2.2.2 侵蚀模数与平均剪切力关系对比分析 侵蚀模数是侵蚀过程单位面积上土壤流失量。分析可知, 非硬化路面侵蚀模数与剪切力之间关系不明显, 各点离散度较大, 坐标轴上呈“扇形”较均匀分布, 而原生地面分布比较集中, 呈“箭”形状分布, 多数点集中箭头部分, 即剪切力 0~10 N/m², 产沙量 0~1.5 kg 范围内, 对两下垫面分别用指数函数和二次函数进行拟合:

$$\text{非硬化地面: } M_{\text{非硬}} = 0.676e^{0.108r} \quad (9)$$

$$(R^2 = 0.362, n = 20)$$

$$\text{原生地面: } M_{\text{原生}} = 3.3 \times 10^{-4} \tau^2 + 0.037\tau - 0.02 \quad (10)$$

$$(R^2 = 0.849, n = 15)$$

非硬化路面拟合式决定系数 R^2 仅为 0.362, 而原生地面二次函数的决定系数达 0.849。由公式 (9)~(10) 可知, 两者发生侵蚀的临界剪切力不同, 原生地面的临界剪切力为 1.1 N/m², 而非硬化路面结果与实际不符, 非硬化路面拟合公式不符合该地面特征。(1) 在坡度较大时, 非硬化路面水流随雨强增大, 水流以滚动方式流动, 水流对地表作用力不均匀, 地表易形成跌坑, 跌坑形成后对地面的作用力不仅有切应力, 还有跌水重力作用, 增大了地表产沙量, 从而导致拟合结果出现偏差; (2) 剪切力采用的是平均剪切力, 而非瞬时剪切力。因此原生地面侵蚀模数与剪切力关系密切, 非硬化路面受其它因素影响关系较复杂。

2.2.3 侵蚀模数与平均水流功率关系对比分析 分析可知, 非硬化路面和原生地面水流侵蚀模数随水流功率增大而增大, 非硬化路面可用二次函数描述, 原生地面可用对数函数描述:

$$\text{非硬化路面: } M_{\text{非硬}} = 1.103\omega^2 - 2.561\omega + 2.375 \quad (11)$$

$$(R^2 = 0.552, n = 20)$$

$$\text{原生地面: } M_{\text{原生}} = 0.234\ln\omega + 0.81 \quad (12)$$

$$(R^2 = 0.487, n = 15)$$

从公式 (11)~(12) 可知, 非硬化路面发生侵蚀时不存在临界功率, 而原生地面临界值为 0.031 N/(m·s), 结果似乎与部分放水冲刷试验结论相悖^[13], 但从试验过程分析, 结论并不矛盾, 在非硬化路面上, 降雨与冲刷不同, 在径流形成之前就会对地表形成击溅侵蚀, 在径流形成后, 在剪切力未达到临界剪切力之前径流不会引起新的侵蚀, 那么此时就只对击溅侵蚀土壤进行搬运, 就造成了未达到临界侵蚀力就造成侵蚀的假象, 而原生地面有植被保护, 雨滴直接作用不大, 主要以形成的径流侵蚀为主。

2.2.4 侵蚀模数与动能关系对比分析 坡面侵蚀量大小还与能量有关, 坡面侵蚀的过程其实是能量变化过程, 而含沙水流的动能大小直接反映水流对侵蚀面的剥蚀能力大小。通过将侵蚀模数与坡面过程总动能建立关系, 有助于对侵蚀量进行模拟和预测。动能采用动能定理公式获取, 即:

$$E = 0.5\gamma QV^2 \quad (13)$$

式中: Q ——坡面全过程径流总量 (m³); V ——平均流速 (m/s); E ——总动能 (J)。

分析可知, 非硬化路面和原生地面侵蚀模数随动能增大而增大, 非硬化路面侵蚀总动能明显大于原生地面, 而两者降雨总动能相同, 造成该结果主要原因有: (1) 入渗因素。非硬化路面经过碾压, 土壤密度大于原生地面, 土壤孔隙度低于原生地面, 不易形成壤中通路, 雨滴降落到地面后不易入渗, 主要以坡面径流形式存在; (2) 植被因素。原生地面有植被存在, 雨滴在与地面接触之前首先接触植被, 植被茎叶对雨滴进行拦截, 降低了雨滴动能, 使最终降落到地面的雨滴能量低于试验设计总动能。通过二次函数和线性拟合, 非硬化路面和原始路面侵蚀模数与动能关系分别为表达式 (14)~(15)。

$$\text{非硬化路面: } M_{\text{非硬}} = 0.379E^2 - 1.689E + 6.188 \quad (14)$$

$$(R^2 = 0.716, n = 20)$$

$$\text{原生地面: } M_{\text{原生}} = 1.007E + 0.272 \quad (15)$$

$$(R^2 = 0.783, n = 15)$$

通过表达式 (14)~(15) 分析可知, 非硬化路面和原生地面都不存在临界动能, 令 $E = 0$, 发现 $M_{\text{原生}} = 0.272$, $M_{\text{非硬}} = 6.188$, 即在径流有初始动能之前就发生了侵蚀, 可以推测是有雨滴直接作用于地面而引起侵蚀, 即雨滴击溅侵蚀, 此过程雨滴在降落到地面时

具有一定的速度冲量,在与地表作用的瞬间使受打击的土壤发生位移。从大小看, $M_{非硬} > M_{原生}$,说明雨滴对非硬化地面作用远大于原生地面,结合上述总动能影响因素推断,结果符合降雨侵蚀实际过程,雨滴对非硬化路面侵蚀作用约是原生地面的 30 倍。

有关坡面侵蚀量定量描述方面,多数学者主要从力和功能两个方向对径流剪切力、功率和动能进行了探讨,具体哪种方式对坡面侵蚀描述结论不一,本研究探讨了侵蚀模数对径流平均水流剪切力、平均水流功率和总动能响应关系,认为径流从能量角度描述坡面侵蚀较好,即动能可以较好描述侵蚀模数与水动力参数的关系(径流动能 $>$ 平均水流功率 $>$ 平均水流剪切力),结果与刘俊娥^[14]坡面片流降雨试验相似。

3 结论

(1) 通过降雨试验比较了非硬化路面和原生地面的水动力参数变化,结果表明非硬化路面与原生地面差异较大。由雷诺数判断,在试验条件下,非硬化路面流态主要为过渡流,而原生地面主要为层流,但都表现为缓流。非硬化路面水流流速、剪切力、佛汝德数、雷诺数和功率均大于原生地面,曼宁系数、达西阻力系数小于原生地面。

(2) 非硬化路面产沙量随径流量增大,而原生地面受地面植被对降雨的影响,产沙量随径流量变化缓慢,产沙量仅为非硬化路面的 0.8%~14%,因此,减少对原生地面的干扰可以减少水土流失。

(3) 非硬化路面侵蚀模数与水动力参数响应关系与原生地面不一致。非硬化路面坡面侵蚀模数与平均剪切力、平均水流功率相关性不大,而原生地面与平均剪切力相关性明显,与平均水流功率不明显。但总体而言,非硬化路面侵蚀模数随动能响应明显,决定系数较剪切力和水流功率高,能很好地描述降雨侵蚀过程,即非硬化路面侵蚀模数对水动力参数响应的强弱关系为:径流动能 $>$ 平均水流功率 $>$ 平均水流剪切力。

[参 考 文 献]

- [1] 张科利,徐宪利,罗丽芳. 国内外道路侵蚀研究回顾与展望[J]. 地理科学, 2008, 28(1): 119-123.
- [2] Fransen P J B, Phillips C J, Fahey B D. Forest road erosion in New Zealand: Overview[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2001, 26(2): 165-174.
- [3] Nyssen J, Poesen J, Moeyersons J, et al. Impact of road building on gully erosion risk: A case study from the northern Ethiopian Highland [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002, 27(12): 1267-1283.
- [4] Carr W W, Ballard T M. Hydroseeding forest roadsides in British Columbia for erosion control [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1980, 35(1): 33-35.
- [5] 王贞,王文龙,罗婷,等. 非硬化路面侵蚀产沙规律野外模拟试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 79-83.
- [6] 崔欢虎,闫翠萍,靖华,等. 黄土丘陵区不同下垫面降雨产流与蓄水窖工艺技术[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 101-104.
- [7] 田风霞,刘刚,郑世清,等. 草本植物对土质路面径流水动力学特征及水沙过程的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 25-29.
- [8] 刘刚,郑世清,田风霞,等. 坡度与降雨强度对植物路面侵蚀动力参数的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 3(4): 44-49.
- [9] 郑世清,田风霞,王占礼,等. 植物路与土质路产流产沙过程的比较试验[J]. 泥沙研究, 2009(4): 1-6.
- [10] 曹世雄,陈莉,高旺盛. 在黄土丘陵区土质路面种草[J]. 生态学报, 2005, 25(7): 1754-1763.
- [11] Nearing M A, Simanton J R, Norton L D, et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24(8): 677-686.
- [12] 张宽地,王光谦,吕宏兴,等. 模拟降雨条件下坡面流水动力学特性研究[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 229-235.
- [13] 罗婷,王文龙,王贞,等. 非硬化土路土壤剥蚀率与水动力学参数分析[J]. 人民黄河, 2011, 3(4): 96-102.
- [14] 刘俊娥,王占礼,高素娟,等. 黄土坡面片蚀过程动力学机理试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 144-149.