

野外模拟降雨条件下矿区土质道路径流产沙及细沟发育研究

郭明明¹, 王文龙^{1,2*}, 李建明³, 朱宝才^{1,4}, 史倩华¹, 康宏亮¹, 李艳富⁵

(1. 西北农林科技大学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;
2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 3. 长江科学院水土保持研究所, 武汉 430010;
4. 山西农业大学林学院, 太谷 030801; 5. 南京水利水电科学院, 南京 210029)

摘要: 为研究矿区土质道路径流产沙及细沟形态发育特征, 在野外调查的基础上, 设计坡度(3°、6°、9°、12°)和雨强(0.5、1.0、2.5、2.0、2.5、3.0 mm/min) 2 个处理, 在野外建立不同坡度的道路小区, 采用人工模拟降雨的方法, 测定了不同处理道路径流产沙参数和细沟形态指标。结果表明: 1) 各坡度道路径流率为 1.12~8.24 L/min, 与雨强线性关系极显著, 随坡度变化不显著; 除 0.5 mm/min 雨强 3°~9°坡及 1.0 mm/min 雨强 3°坡道路径流流态为层流外, 其余为紊流, 雨强-坡度交互作用($I \times S$)对流态影响显著; 阻力系数只与坡度相关。2) 各坡度道路剥蚀率为 0.92~324.46 g/(m²·s), 与雨强、坡度和径流率呈极显著幂函数关系($R^2=0.968$, $P<0.01$), 道路土壤发生剥蚀的临界剪切力和临界径流功率分别为 2.15 N/m² 和 0.41 W/(m²·s)。3) 3°道路以片状侵蚀为主, 6°~12°道路细沟发育, 细沟宽深比、复杂度、割裂度和细沟密度分别为 1.80~3.75、1.07~1.55、0.20%~10.33%和 0.067~2.01 m/m², 细沟发育程度是雨强和坡度交互作用($I \times S$)的结果。4) 6°~12°道路细沟侵蚀量占总侵蚀量比例为 18.0%~57.16%, 总侵蚀量与细沟宽深比、细沟复杂度、细沟割裂度和细沟密度均呈显著的函数关系($R^2=0.35\sim 0.96$, $P\leq 0.01$), 割裂度是影响土质道路总侵蚀量的最佳细沟形态因子。结果可为矿区土质道路水土保持工程设计及生产安全提供参数支持。

关键词: 侵蚀; 径流; 水动力学; 神府矿区; 道路; 细沟; 形态特征

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.24.020

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-24-0155-09

郭明明, 王文龙, 李建明, 朱宝才, 史倩华, 康宏亮, 李艳富. 野外模拟降雨条件下矿区土质道路径流产沙及细沟发育研究[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 155—163. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.24.020 <http://www.tcsae.org>
Guo Mingming, Wang Wenlong, Li Jianming, Zhu Baocai, Shi Qianhua, Kang Hongliang, Li Yanfu. Runoff, sediment yield and rill development characteristic of unpaved road in mining area under field artificial simulated rainfall condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(24): 155—163. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.24.020 <http://www.tcsae.org>

0 引言

道路侵蚀与坡面侵蚀及沟道侵蚀等在概念上相平行, 包含了多种侵蚀过程和方式^[1]。与传统农地相比, 道路土壤具有容重大, 孔隙度小, 径流系数大, 渗透性能差等特点, 经过机械反复碾压后在路面形成一定厚度的松散浮土^[2-4]。降雨条件下路面易于产流, 径流汇集成股易造成路面沟蚀, 从而加剧流域水土流失^[5-6]。近年来, 国内外许多学者针对道路侵蚀监测方法^[6-8]、径流产沙特征^[9-13]、预测模型^[14-15]等方面开展了广泛研究。野外道路径流小区是研究自然降雨条件下路面径流产沙特征的传统方法, 由于受到往来机械车辆的影响, 这种监测方法很难长期地对道路侵蚀做出精确的估测, 因此, 许多研究多采用模拟降雨和防水冲刷的方法研究道路侵蚀^[6,8,15]。

Martínez-Zavala 等^[9]通过模拟降雨方法对土质路和植物路产流产沙特征进行研究, 结果表明植物路径流系数和侵蚀速率均小于土质路, 两种道路径流在冬季分别增加了 1.7 和 3.1 倍。Dong 等^[10]对公路建设过程中形成的堆积体和压实土路进行模拟降雨试验研究, 结果表明容重是影响道路产流的主要因素。Carlos 等^[11]对不同坡度的废弃路土壤侵蚀研究发现, 侵蚀速率是自然侵蚀速率的 15~50 倍, 且随坡度增大而增大。Cao 等^[6]对黄土高原道路侵蚀模型研究认为道路侵蚀速率可用降雨强度、坡度和径流率的幂函数预测。另外, 一般土质道路路面存在一定厚度的浮土, 浮土物理性质与碾压路面差异显著, 对侵蚀过程有着一定的影响, 史志华等^[12]认为土质路面覆盖的浮土在降雨初期很快流失, 也有研究^[13]表明在浮土侵蚀阶段径流量在产流 3 min 内可显著增加 6.93 倍。为了探明道路侵蚀的水动力学机理, 黄鹏飞等^[16]通过野外放水试验研究道路土壤侵蚀水动力特征表明, 剥蚀率与径流动能呈幂函数关系, 路面发生侵蚀的临界单宽能耗为 2.88 g/(m·J), Cao 等^[17]对安塞县农田土质道路研究表明, 干道、次级道路及三级道路发生侵蚀的临界剪力分别为 2.12、6.68、9.67 N/m²。

综上所述, 国内外学者采用不同的方法对各类型土

收稿日期: 2016-03-03 修订日期: 2016-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(41571275, 41302199); 中国科学院西部行动计划(KZCX-XB3-13); 中国科学院知识创新工程重大项目(KZZD-EW-04-03)

作者简介: 郭明明, 男, 博士生, 主要从事土壤侵蚀研究。杨凌 西北农林科技大学 水土保持研究所, 712100。Email: st_gmm@163.com

*通信作者: 王文龙, 男, 博士生导师, 研究员, 主要研究方向为土壤侵蚀与水土保持。杨凌 中科院水利部水土保持研究所, 712100。

Email: wlwang@nwsuaf.edu.cn

质道路的径流产沙过程、侵蚀水动力特征及影响道路侵蚀的影响因素等方面做了许多研究。但还存在以下不足,首先,目前道路侵蚀研究对象多为农田、交通及林内土质道路,而针对于矿区土质运输道路的研究还较为鲜见。其次,矿区土质道路由于机械碾压频繁,在路面形成一定厚度的松散浮土,而目前在进行道路模拟试验时,大多数研究对道路的处理仅仅是控制土壤容重,很少考虑路面浮土的存在,且路面极易产流,径流冲刷路面容易形成细沟,破坏道路结构,在道路侵蚀研究中有关细沟的报道还较为少见。本文在野外建立试验小区的基础上通过模拟降雨的试验方法对神府矿区土质道路径流产沙规律和细沟发育特征进行了研究,结果可为矿区土质道路水土流失防治和水土保持工程设计提供参数支持,具有重要的科学价值和生产意义。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验选择在晋陕蒙三省交界的神府东胜矿区(37°20′~40°16′ N, 108°36′~110°3′ E)。该区属典型干旱半干旱大陆季风性气候,年均气温 8.0℃,年均降雨量 325~460 mm,降水多集中于 7—9 月,且多以暴雨形式发生,年蒸发量 1 636~2 535 mm。该区为典型的黄土丘陵地貌,处于风蚀水蚀交错区、黄河粗泥沙来源区、干旱半干旱生态环境脆弱带。土壤类型多为黄土及风沙土,结构松散,抗蚀能力差。植被主要为温带半干旱植被。该区位于暴雨中心,尤其是在人类采矿活动扰动下,夏季水蚀剧烈并占主导地位,春季以风蚀为主,风蚀水蚀交替进行,成为水土流失最严重的地区之一。

1.2 野外调查和因素选择

为使试验尽可能反映野外实际情况,首先对矿区内土质道路进行调查,主要调查矿区内道路坡度、土壤颗粒组成、容重、含水量及当地降雨特征,为试验控制因素及范围的选取提供依据。野外调查土壤容重为 1.68~1.72 g/cm³,试验小区平均容重为 (1.70±0.28) g/cm³,平均含水率为 (8.37±0.28)%。路面坡度在 2°~20°之间,其中<4°占 10.4%,4°~10°占 82.7%,10°~20°占 6.9%;路面上浮土厚度为 0.3~0.6 cm,多集中在 0.5 cm;土质道路土壤层和浮土层颗粒组成见表 1。基于调查结果试验道路小区坡度选择为 3°、6°、9°、12°,浮土厚度为 0.5 cm,依据当地多年自然降雨气象资料频率分析,发生侵蚀性降雨雨强在 0.5~3.0 mm/min,试验依次等步长选择雨强为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 mm/min 6 个水平。

表 1 土质道路土壤层和浮土层颗粒组成

Table 1 Particle composition of soil layer and floating earth layer

类型 Types	颗粒组成 Particle composition	
	粒径 Particle size/mm	质量百分比 Mass percent/%
土壤层 Soil layer	<0.01	9.02
	0.01~0.1	33.86
	>0.1~0.5	49.75
	>0.5~1	5.25
	>1~2	2.12
浮土层 Floating earth layer	<0.001	9.11
	>0.001~0.1	53.24
	>0.1~2	37.65

1.3 试验设计

野外调查发现,矿区内土质道路多起伏,同一路段每种坡度对应的坡长变化也较大。为在尽可能少破坏路面原有土壤结构同时保证 1 个小区内坡度一致性,在小区布设时考虑野外供水用电等试验条件,结合降雨器特征合理规划试验小区。如图 1 所示,建立 2 个 3 m×1 m 的试验小区,在这 2 个小区上同时进行降雨试验,即各次试验重复 2 次,试验结束后重新布设新的小区进行试验。

试验小区建立如下:将选取道路上的浮土及杂物清扫收集,对明显凹凸不平之处进行平整以达到设计坡度,将收集的浮土过 2 mm 筛除去杂物后,按照粒径组成配比后均匀铺设在路面上 0.5 cm 厚,以恢复真实路面,各小区浮土用量 16.5 kg。小区边界采用长 3.0 m、宽 50 cm、厚 2.5 mm 铁皮插入地下 30 cm,将与小区边界接触的土壤充分压实防止试验过程中边界渗水,小区末端设钢制三角集流槽,接泥沙样用,在距顶部 0.25 和 1.75 m 处设置 2 个 1 m 长的测流断面。在小区周围利用钢管搭建降雨棚,小区正上方布置下喷式模拟降雨器,喷头高度为 3.0 m,喷头间距 1.0 m,降雨雨滴终速接近天然降雨^[18],降雨均匀度在 80%以上,通过阀门和压力表控制雨强,将防风布固定在降雨棚四周防止风对降雨均匀度的干扰。降雨器布设后,将自制测针系统架设于小区边界上,测针系统支架可沿小区边界上下滑动,测针可横向滑动,测量精度为 1 mm。本研究共设计 6×4×2=48 场试验。

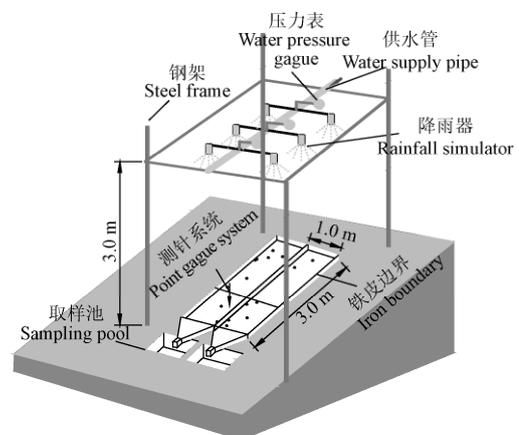


图 1 试验模型示意图

Fig.1 Sketch of experimental model

1.4 试验过程与数据采集

试验前使用遮雨布遮盖小区,在试验区域均匀摆放 6 个雨量筒,降雨器开启后用雨量筒读取单位时间内的降雨量,换算为降雨强度,率定雨强与设计雨强误差在 5% 以内,均匀度要求在 80%以上,率定符合要求后,快速掀起小区上方遮雨布,坡面产流后记录产流时间并在集流槽出口使用有刻度的接样桶接径流泥沙样并记录取样时间和体积,前 3 min 内每 1 min 接 1 次泥沙样,3 min 后每 3 min 接 1 次泥沙样,设计产流历时 45 min,取样的同时使用 KMnO₄ 溶液和秒表测流速,各次测量流速取 2 断面的平均值作为每次测量流速,使用精度为 1 mm 的薄钢尺测径流宽度,同一观测时段内观测多次取平均值,用烘干法测定所接各个样品中的泥沙质量,

使用普通温度计测量水温，每次试验后使用测针系统对形成的细沟长度、宽度及深度进行测量，测量时对各细沟每 5 cm 取 1 断面，遇细沟分支及发育特殊之处据实际情况加测数次。

1.5 数据计算

1) 径流参数计算。本文涉及径流参数有雷诺数 Re 、Darcy-weisbach 阻力系数 f 、径流剪切力 τ 、径流功率 ω ，依据明渠水流公式计算以上径流参数^[16,19]。

2) 各次试验土壤总侵蚀量由细沟侵蚀量和细沟间侵蚀量组成。细沟侵蚀量是指各次试验后形成的沟槽所流失的土壤质量。细沟体积 V 和侵蚀量 M_r 采用容积法^[20-21] 计算，细沟横断面假设为“V”形，计算式为

$$\left\{ \begin{aligned} M_r &= \frac{1}{2} \rho_f \sum_{i=1}^n d_i \cdot h_i \cdot l_i, \quad h_i \leq 0.005 \text{ m} \\ M_r &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n l_i \cdot d_i \left[\begin{aligned} &0.005 \times \left(1 + \frac{h_i - 0.005}{h_i} \right) \cdot \rho_f + \\ &\left(\frac{h_i - 0.005}{h_i} \right) \cdot (h_i - 0.005) \cdot \rho_d \end{aligned} \right], \quad h_i > 0.005 \text{ m} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中 M_r 为细沟土壤流失量，kg； d_i ， h_i ， l_i 分别为第 i 个测量断面处细沟宽度、深度和长度，m； ρ_f 和 ρ_d 为浮土层和土壤层容重， kg/m^3 ； n 为测量断面个数。

3) 细沟宽深比是指细沟宽度与其对应深度的比值，反映细沟沟槽形状的变化，其计算式如下^[22]

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (2)$$

式中 α 为细沟宽深比。

4) 细沟复杂度是指坡面某条细沟及其分支的总长度与其在坡面方向上垂直长度比值，反映细沟沟网丰富程度，其计算式如下^[22]

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^p l_{rj}}{p} \quad (3)$$

式中 β 为细沟复杂度； l_{ri} 为第 i 条细沟长度，m； l_{ci} 为第 i 条细沟在坡面方向上垂直长度，m； p 为细沟总条数。

5) 细沟割裂度是指坡面上形成的细沟面积与小区面积比值，反映坡面破碎程度和细沟侵蚀强度，其计算式如下^[22]

$$\gamma = \frac{\sum_{j=1}^p A_{rj}}{A_c} \quad (4)$$

式中 γ 为细沟割裂度； A_{ri} 为第 i 条细沟面积， m^2 ； A_c 为试验小区面积， m^2 。

6) 细沟密度是指坡面上形成的细沟长度与小区面积比值， m/m^2 ，反映坡面破碎程度，其计算式如下^[22]

$$\xi = \frac{\sum_{j=1}^p l_{rj}}{A_c} \quad (5)$$

式中 ξ 为细沟密度， m/m^2 。

7) 土壤剥蚀率即单位时间单位面积径流所能剥蚀土壤的质量， $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ ，其计算式如下

$$D_r = \frac{1000M_s}{A_c \cdot t} \quad (6)$$

式中 M_s 为时间 t (min) 内坡面侵蚀量，g，由径流泥沙样确定。

采用 Excel 2003 和 SPSS 16.0 进行数据统计、方差分析及相关和回归分析，采用 Origin 8.5 进行数据绘图。

2 结果与分析

2.1 土质道路径流变化特征

表 2 为不同雨强条件下各坡度土质道路径流率、雷诺数及阻力系数的变化，表 3 为径流水力学参数与雨强 I 、坡度 S 及雨强-坡度交互作用 ($I \times S$) 的相关系数统计。由表 2 可知， $3^\circ \sim 12^\circ$ 土质道路径流率分别为 1.17~7.65、1.12~7.88、1.16~7.17 和 1.18~8.24 L/min。同一坡度土质道路径流率随雨强增大而逐渐增大，二者呈极显著线性关系 ($R^2=0.984 \sim 0.997$, $P < 0.01$)；雨强相同时， 6° 、 9° 和 12° 道路径流率分别是 3° 坡的 0.96~1.09 倍、0.94~1.16 倍和 1.01~1.10 倍，不同坡度道路径流率之间差异不显著 ($P > 0.05$)。由表 3 可知，土质道路径流率与坡度相关性不显著 ($P > 0.05$)，但与雨强 I 和雨强-坡度交互作用 ($I \times S$) 均极显著相关 ($P < 0.01$)。

表 2 土质道路径流参数统计

Table 2 Statistics of runoff parameters of unpaved road for all experiments

雨强 Rain intensity/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	坡度 Slope/($^\circ$)	径流率 Runoff rate/ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	雷诺数 Reynolds number	阻力系数 Resistance coefficient	雨强 Rain intensity/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	坡度 Slope/($^\circ$)	径流率 Runoff rate/ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	雷诺数 Reynolds number	阻力系数 Resistance coefficient
0.5	3	1.17Aa	232.38Aa	0.45Aa	2.0	3	4.29Acd	950.56Ad	0.91Ab
	6	1.12Aa	255.14Aa	1.06Ba		6	4.60Acd	1 299.26Bc	1.35Bab
	9	1.16Aa	409.13Ba	2.19Cb		9	4.97Acd	1 484.23Bc	1.65Ba
	12	1.18Aa	589.69Ca	4.47Db		12	4.41Ac	1 825.37Cc	1.91Ca
1.0	3	2.23Aab	462.98Ab	0.61Aab	2.5	3	5.75Ad	995.03Ad	0.99Ab
	6	2.34Aab	693.71ABb	1.09Ba		6	6.26Ade	1 204.62ABc	1.37ABab
	9	2.34Aab	682.34ABb	1.90Cab		9	6.22Ade	1 384.02Bbc	1.63Ba
	12	2.36Aab	761.96Ba	3.90Db		12	6.33Ad	1 918.32Ccd	3.72Cb
1.5	3	3.39Abc	712.84Ac	0.64Aab	3.0	3	7.65Ae	949.89Ad	1.42Ac
	6	3.44Abc	775.68Ab	1.14Ba		6	7.88Ae	1 534.59Bd	1.55Ab
	9	3.27Abc	1 063.13Bc	1.75Cab		9	7.17Ae	1 971.35Cc	1.72Bab
	12	3.45Abc	1 229.40Cb	2.21Da		12	8.24Ae	2 073.00Cd	1.90BCa

注：不同小写字母表示同一坡度不同雨强差异显著；不同大写字母表示同一雨强不同坡度差异显著，下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among rainfall intensities under the same slope; different capital letters indicate significant difference among slopes under the same rainfall intensity, the same as below.

表3 径流产沙参数与雨强、坡度及其交互作用的相关系数
Table 3 Correlations between runoff and sediment parameters and coupling effects of rainfall intensity and slope

变量 Variable	径流率 Runoff rate/(L·min ⁻¹)	雷诺数 Reynolds number	阻力系数 Resistance coefficient	剥蚀率 Detachment rate/(g·m ⁻² ·min ⁻¹)
<i>I</i>	0.99**	0.82**	-0.09	0.75**
<i>S</i>	0.03	0.48*	0.80**	0.40
<i>I</i> × <i>S</i>	0.72**	0.95**	0.34	0.90**

注：*表示显著性水平在 0.05；**表示显著性水平在 0.01；*I* 为降雨强度 (mm/min)；*S* 为坡度(°)；*I*×*S* 表示雨强和坡度的交互作用，下同。
Note: *. Correlation is significant at the 0.05 level; **. Correlation is significant at the 0.01 level; *I*, rainfall intensity; *S*, slope; *I*×*S*, the interaction of rainfall intensity and slope, the same as below.

雷诺数 *Re* 是表征径流流态参数，由表 2 可知，雨强为 0.5 mm/min、坡度分别为 3°、6°、9°及雨强为 1.0 mm/min 雨强条件下 3°坡土质道路径流流态属层流范畴 (*Re*<500)，其余条件下均为紊流。随着雨强和坡度增大，路面径流流态转变为紊流，这是由于坡度增大了径流流速，雨强增强了径流的紊动性。整体上，*Re* 均随坡度和雨强的增大而增大；同一坡度道路不同雨强径流 *Re* 之间存在一定差异；雨强相同条件下，6°、9°和 12°道路径流 *Re* 分别是 3°坡的 1.09~1.62 倍、1.39~2.08 倍和 1.65~2.54 倍。相关分析结果 (表 3) 表明，*Re* 与雨强-坡度交互作用 (*I*×*S*) 相关性最高，这也说明了雨强和坡度共同作用决定了径流流态变化。

阻力系数 *f* 表示径流受到阻力的大小。不同雨强条件下 3°坡道路径流阻力系数为 0.45~1.42，同雨强条件下 6°、9°和 12°道路径流 *f* 是 3°坡的 1.09~2.37 倍、1.21~4.90 倍和 1.34~10.02 倍。对于同一雨强，道路径流 *f* 随坡度增大而逐渐增大；对于同一坡度，3°和 6°土质道路 *f* 随雨强的增大而增大，而 9°和 12°土质道路 *f* 整体上随雨强增大而减小。相关分析表明，*f* 只与坡度显著相关 (*P*<0.05)。

2.2 土质道路侵蚀特征

2.2.1 道路土壤剥蚀率变化特征

由图 2 可知，3°~12°坡土质道路土壤剥蚀率均随雨强和坡度增大而增大，3°坡道路土壤剥蚀率为 0.92~54.77 g/(m²·min)，同一雨强条件下 6°、9°和 12°道路土壤剥蚀率分别是其 1.40~3.22 倍、1.78~5.74 倍和 1.96~11.57 倍，当雨强>1.0 mm/min 时，6°、9°和 12°道路土壤剥蚀率均显著高于 3° (*P*<0.05)。同一坡度土质道路，雨强越大剥蚀率之间差异也逐渐增大，各坡度道路土壤剥蚀率与雨强呈极显著幂函数关系 (*R*²=0.871~0.938, *P*<0.01)。表 3 相关分析结果表明，剥蚀率与坡度相关性不显著 (*P*>0.05)，与雨强及雨强-坡度交互作用 (*I*×*S*) 相关性极显著 (*P*<0.01)，这表明土质道路土壤侵蚀受雨强和坡度交互作用 (*I*×*S*) 的影响。

Cao 等^[6]认为道路土壤剥蚀率的大小是由雨强、坡度、径流及土壤 4 个方面的因素决定。而本研究道路土壤为同一类型，由上分析可知，雨强—坡度交互项 (*I*×*S*) 对道路土壤剥蚀率影响显著，图 3 为土质道路土壤剥蚀率与径流率 (*Q*) 关系，土壤剥蚀率随径流率增大而增大，二者幂函数关系极显著 (*R*²=0.812, *P*<0.01)，这说明径

流率也对道路土壤剥蚀具有显著的影响。为分析雨强、坡度及径流率共同作用对土壤剥蚀的影响，回归分析剥蚀率与三者关系结果表明，剥蚀率与三者呈极显著幂函数关系： $D_r=0.57I^{0.69}S^{1.10}Q^{1.34}$ (*R*²=0.968, *P*<0.01)。

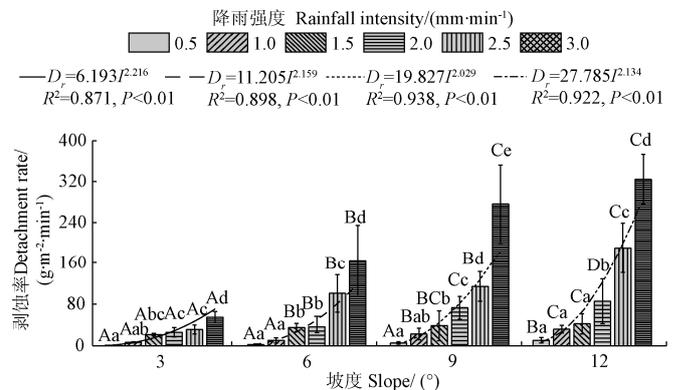


图2 不同降雨条件下土质道路土壤剥蚀率变化
Fig.2 Variation of soil detachment rate of unpaved road under different rainfall intensity conditions

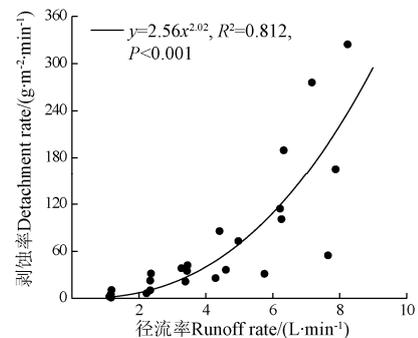
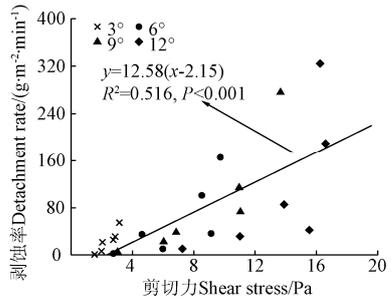


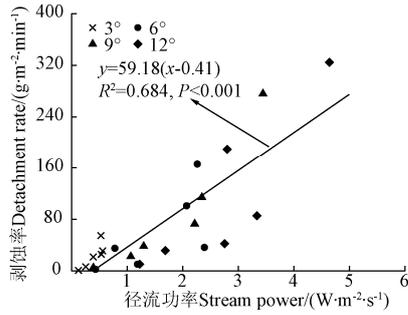
图3 土质道路土壤剥蚀率与径流率之间关系
Fig.3 Relationship between soil detachment rate of unpaved road and runoff rate

2.2.2 道路土壤侵蚀动力特征

土壤侵蚀是由径流冲刷能力与土壤抗蚀性的相互作用决定^[23]。径流水动力大小决定土壤侵蚀强弱，国内外有关道路侵蚀模型的研究所采用的水动力学多为径流剪切力 τ 和径流功率 ω ， τ 为径流力学参数， ω 则属径流能量范畴^[6,15-16]。图 4 为土壤剥蚀率与剪切力和径流功率之间的关系，3°坡土质道路径流剪切力为 1.52~7.26 N/m²，6°、9°和 12°径流剪切力分别是其 0.64~4.0 倍、1.43~3.65 倍和 1.04~7.20 倍；3°坡土质道路径流功率为 0.12~1.19 W/(m²·s)，相同降雨条件下，6°、9°和 12°土质道路径流功率是其 1.005~8.59 倍、2.22~5.65 倍和 1.34~18.90 倍。回归分析表明，剥蚀率随剪切力的增大以线性方式增大 (*R*²=0.516, *P*<0.001)，图 4a 中拟合方程的斜率为土壤可蚀性参数，基于国际制统一单位计算为 2.10×10⁻⁴ s/m，括号中常数为临界剪切力，即道路发生土壤剥蚀的临界径流剪切力为 2.15 N/m²。剥蚀率与径流功率线性关系极显著 (*R*²=0.684, *P*<0.001)，图 4b 中拟合方程的斜率是土壤可蚀性参数，基于国际制统一单位计算为 0.99 g/W，括号中常数为临界径流功率，也即道路发生土壤剥蚀的临界径流功率为 0.41 W/(m²·s)。



a. 剥蚀率与剪切力的关系
a. Relationship between detachment rate and shear stress



b. 剥蚀率与径流功率的关系
b. Relationship between detachment rate and stream power

图 4 土质道路土壤剥蚀率与水动力学参数关系

Fig.4 Relationship between soil detachment rate of unpaved road and hydrodynamic parameters

2.3 土质道路细沟发育特征

一般认为细沟侵蚀形成的沟槽宽和深均不超过 20 cm，细沟宽深比 α 、复杂度 β 、割裂度 γ 和细沟密度 ξ 是表征细沟形态的重要参数^[22]。3°坡道路较缓，水流较均匀，浮土层与土壤层容重差异较大，跌坎深度与浮土层厚度接近，降雨过程中跌坎以片状方式连通，连通后的沟槽宽而浅，平均宽度均大于 20 cm，平均深度 1 cm 左右，3°坡道路并未出现明显细沟，而以片状侵蚀为主。随着坡度增加，径流下切能力增强，6°、9°及 12°坡面出现不同形态的细沟。6°~12°道路细沟形态参数统计如表 4 所示，各参数与雨强、坡度及其交互作用的相关系数如表 5 所示。

表 4 细沟形态特征指标统计

Table 4 Statistics of rill morphology parameters

雨强 Rain intensity/ (mm·min ⁻¹)	坡度 Slope/(°)	宽深比 Breadth depth ratio	复杂度 Complexity degree	割裂度 Split degree/%	密度 Density/ (m·m ⁻²)
0.5	6	3.75Ac	1.07Aa	0.20Aa	0.067Aa
	9	2.50Aa	1.09Aa	0.25Aa	0.080Aa
	12	2.17Aa	1.20Aa	0.49Aa	0.30Aa
1.0	6	3.49Abc	1.08Aa	0.87Aa	0.20Aab
	9	2.04Aa	1.13Aa	2.07Ab	0.72Ab
	12	2.02Aa	1.36Aa	1.75Aa	0.51Aab
1.5	6	3.74Ac	1.10Aa	3.41Ab	0.63Aabc
	9	2.50Aa	1.13Aa	3.45Ab	0.75Ab
	12	1.80Aa	1.32Aa	3.68Ab	0.75Aabc
2.0	6	3.33Abc	1.13Aa	3.40Ab	0.77Abc
	9	2.30Aa	1.16Aa	3.73Ab	0.89Ab
	12	1.94Aa	1.36Aa	5.78Bc	0.90Aabc
2.5	6	2.25Aab	1.20Aa	5.03Ab	1.10Ac
	9	1.93Aa	1.22Aa	3.95Ab	0.87Ab
	12	2.16Aa	1.43Aa	7.71Bd	1.17Ac
3.0	6	1.97Aa	1.36Aa	6.83Ac	1.96Bd
	9	2.00Aa	1.39Aa	9.33Bc	1.30Ab
	12	1.99Aa	1.55Aa	10.33Be	2.01Bd

表 5 细沟沟形态参数和侵蚀量与雨强、坡度及其交互作用的相关系数

Table 5 Correlations between rill morphological parameters and erosion mass coupling effects of rainfall intensity and slope

参数 Parameter	宽深比 Breadth depth ratio	复杂度 Complexity degree	割裂度 Split degree/%	密度 Density/ (m·m ⁻²)	总侵蚀量 Total erosion yield/kg	细沟侵蚀量 Rill erosion yield/kg
I	-0.42	0.66**	0.92**	0.91**	0.86**	0.89**
S	-0.69**	0.63**	0.24	0.11	0.25	0.27
$I \times S$	-0.59**	0.86**	0.93**	0.81**	0.89**	0.93**

细沟宽深比 α 反映细沟沟槽形状，6°、9°及 12°道路细沟宽深比分别为 1.97~3.75、1.93~2.50 和 1.80~2.17，除 3.0 mm/min 雨强条件下 9°和 12°路面细沟宽深比与 6°接近外，其余雨强条件下，9°和 12°路面细沟宽深比较 6°减小 14%~41%和 4%~52%，这表明相同降雨条件下，坡度越大，径流易汇集，径流剪切力随之而增强，细沟下切越深。不同坡度道路细沟宽深比差异不显著 ($P>0.05$)。不同雨强条件下 6°坡道路细沟宽深比呈现一定差异性，但坡度增大至 9°和 12°时，不同雨强形成的细沟宽深比差异不显著 ($P>0.05$)。由表 5 可知， α 与 I 不相关 ($P>0.05$)，但与 S 和 $I \times S$ 相关性极显著 ($P<0.01$)，这表明坡度对细沟形状的影响较大，使雨强对其影响被掩盖^[24]。

细沟复杂度 β 表征细沟沟网的丰富度，6°道路细沟复杂度为 1.07~1.36，9°和 12°路面细沟复杂度分别是 6°的 1.01~1.04 倍和 1.13~1.26 倍，相同雨强条件下，随着坡度增大，细沟复杂度增大；同一坡度道路细沟复杂度随雨强增大而增大。这表明坡度和雨强越大，细沟在道路上分布越为复杂，但不同坡度和雨强条件下路面细沟复杂度差异均不显著 ($P>0.05$)。由表 5 可知， β 与 I 、 S 和 $I \times S$ 均极显著相关 ($P<0.01$)，且与 $I \times S$ 相关性最强，这说明了雨强和坡度的交互作用对道路细沟沟网丰富度影响最大^[25-26]。

细沟割裂度 γ 和细沟密度 ξ 反映坡面破碎程度和细沟侵蚀强度。6°、9°和 12°坡道路细沟割裂度 γ 分别为 0.20%~6.83%、0.25%~9.33%和 0.49%~10.33%，雨强为 2.0 和 2.5 mm/min 时，12°坡道路细沟割裂度显著高于 6°和 9°。6°~12°道路细沟密度分别为 0.067~1.96、0.08~1.30、0.30~2.01 m²，相同降雨条件下（除 3.0 mm/min 外），各坡度道路细沟密度无显著差异 ($P>0.05$)；6°和 12°坡度道路细沟密度随雨强增大而增大。相关分析表明， γ 和 ξ 与 S 均不相关 ($P>0.05$)，但与 I 和 $I \times S$ 相关性极显著 ($P<0.01$)，这表明雨强对细沟割裂度和密度的影响较大，使坡度对其影响被掩盖^[24]。

2.4 细沟对土质道路土壤侵蚀的影响

图 5a、5b 为不同降雨强度条件下 6°、9°和 12°道路总侵蚀量 M_s 和细沟侵蚀量 M_r 对比。6°道路土壤总侵蚀量为 0.34~22.34 kg，相同降雨条件下，9°和 12°道路土壤 M_s 增大 0.10~1.19 倍和 0.21~3.23 倍。6°道路细沟侵蚀量 M_r 为 0.064~7.58 kg，9°和 12°道路 M_r 分别是其 0.89~3.10 倍和 1.47~4.29 倍，除 0.5 和 2.5 mm/min 雨强外，其余雨强条件下 9°和 12°道路 M_r 显著高于 6°；各坡度道

路 M_r 随雨强的增大而增大。由表 5 可知, M_s 和 M_r 与 S 均不相关 ($P>0.05$), 但均 $I \times S$ 相关程度最高 ($P<0.01$), 这说明雨强和坡度的交互作用对道路土壤总侵蚀量和细沟侵蚀量的影响最显著。

相同条件下 6° 、 9° 和 12° 道路细沟侵蚀量分别占总侵蚀量的 18.74%~46.40%、18.0%~57.16% 和 19.02%~56.21%。同一坡度道路细沟侵蚀量所占比例随雨强增大呈先增大后减小的趋势, 雨强为 0.5 mm/min 时最小, 雨强为 1.5 或 2.0 mm/min 时最大。这是由于雨强较小时, 路面上细沟发育程度低, 且细沟侵蚀泥沙中大多数来自于浮土颗粒, 道路产沙以细沟间侵蚀为主, 因此, 细沟侵蚀量所占比例较小; 随着雨强增大, 细沟发育程度较高, 坡面水流更为集中, 细沟内径流下切能力增强, 细沟侵蚀量也相对增大, 当雨强 >1.5 mm/min 时, 由于雨强较大, 细沟间径流剥蚀土壤能力相对增强, 细沟间径流侵蚀能力增加幅度高于细沟内径流, 因此, 细沟侵蚀量所占比例相对减小。

由表 5 可知, 雨强-坡度的交互作用 ($I \times S$) 对道路细沟形态和侵蚀量影响极显著 ($P<0.01$), 这是由于雨强和坡度越大, 细沟密度和复杂度增大、细沟径流路径增长、径流侵蚀能力增强^[22,25-26], 从而使坡面破碎更加严重并加剧了道路土壤侵蚀。回归分析总侵蚀量与细沟形态参数之间的关系如图 6 所示。由图 6c 和图 6d 可知, M_s 与细沟割裂度和细沟密度均呈递增的幂函数关系 ($R^2=0.96$ 和 0.73 , $P<0.01$), 与细沟复杂度呈递增的线性函数关系 (图 6b, $R^2=0.66$, $P<0.01$), 这表明随着细沟发育密度越大、复杂程度和割裂路面程度越高, 总侵蚀量越大。图 6a 表明, M_s 与细沟宽深比呈递减的指数函数关系 ($R^2=0.35$, $P=0.01$), 这说明细沟发育宽度越宽、下切深度越小, 侵蚀量越小, 实质上宽深比越大, 沟槽宽而浅, 侵蚀方式

也即以片蚀为主。比较总侵蚀量与 4 个细沟形态参数之间关系可知, 割裂度是影响土质道路总侵蚀量的最佳细沟形态因子。

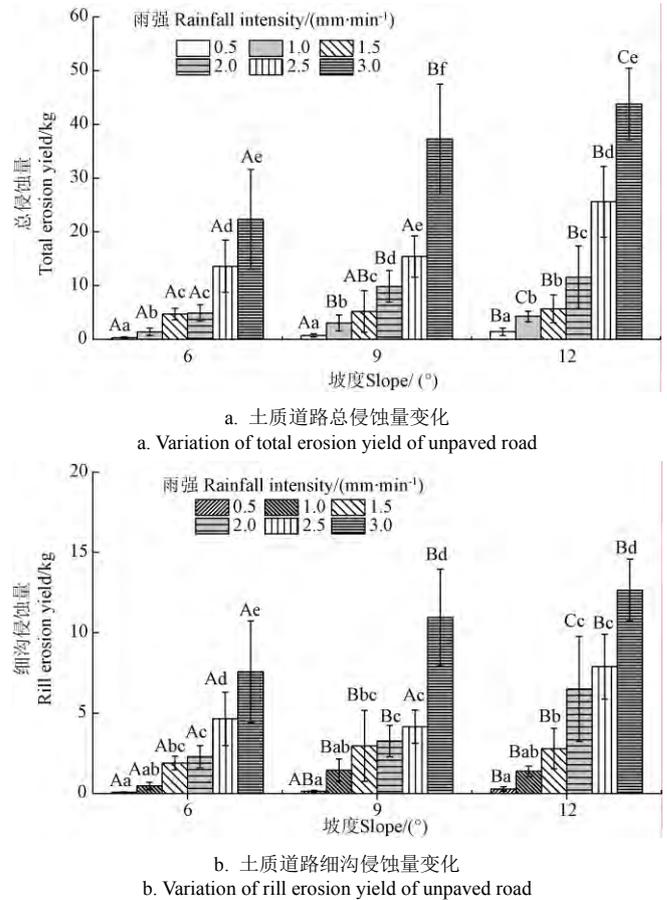


图 5 不同雨强条件下土质道路总侵蚀量与细沟侵蚀量变化
Fig.5 Variation of total erosion yield and rill erosion yield under different rainfall intensity conditions

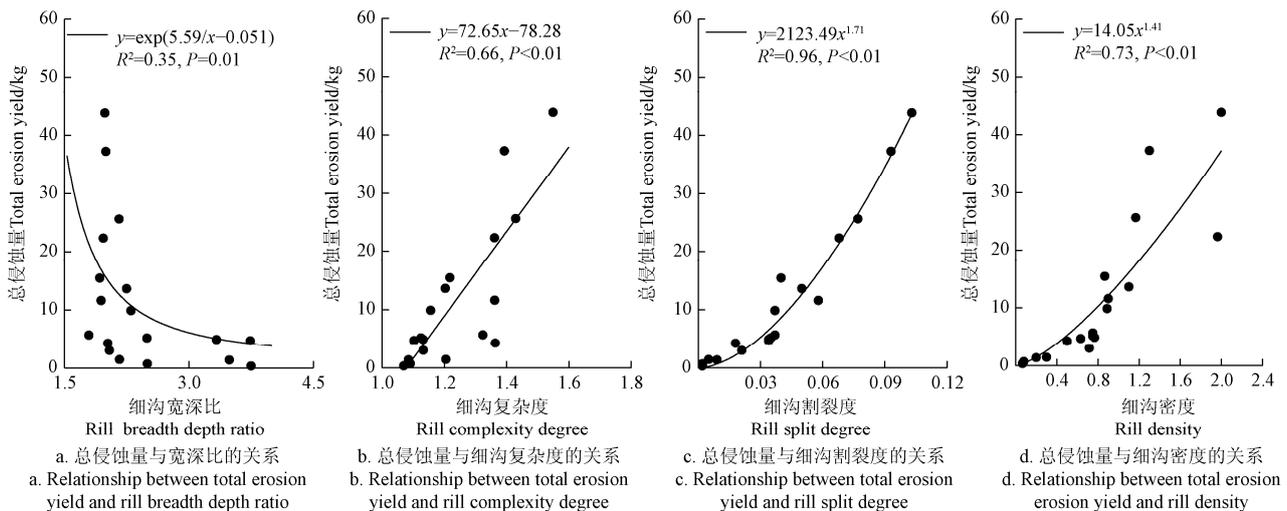


图 6 侵蚀量与细沟形态参数之间的关系
Fig.6 Relationship between erosion yield and rill morphology parameters

3 讨论

3.1 土质道路径流特征

矿区土质道路是一种特殊的坡面类型, 具有容重大,

入渗率低, 路面存在一定厚度浮土等特点^[6,12-13,15], 相应地径流产沙特征具有一定的特殊性。相同降雨条件下本研究土质道路径流率高于郑海金等^[27]对南方红壤区土质道路研究结果, 这是由于南方红壤农田道路容重小于矿

区道路容重, 入渗率相对较大的缘故; 但相同雨强条件下各坡度道路径流率差异不显著 ($P>0.05$), 这是由于坡度增加径流率的同时, 也使径流剪切土壤的能力增强, 路面更为破碎, 滞流作用也增强, 坡度的增大对路面径流率变化存在此消彼长的作用^[24-26]。雨强为 0.5 mm/min 时, 3°~9°道路径流流态尚属层流, 随着雨强和坡度增大, 坡度促进了流速增大, 雨强增强了径流的紊动性, 二者的相互作用使径流紊动性增强^[19], 径流流态转变为紊流, 同时也使坡面细沟更加发育, 因此, 径流受到阻力也相应地增大^[15]。

3.2 土质道路侵蚀特征

矿区土质道路侵蚀过程可分为浮土片蚀阶段和细沟侵蚀阶段^[12-13,28]。3°道路形成的径流较均匀, 径流下切作用弱, 形成的跌坎较浅, 跌坎连通后形成的沟槽宽而浅, 侵蚀过程以片状侵蚀为主。坡度 $>3^\circ$ 时, 径流更加集中, 剪切土壤能力增强, 细沟不断发育, 土壤剥蚀率大大增强, 相同降雨条件下, 6°~12°坡度剥蚀率是 3°坡的 1.40~11.57 倍, 结果与黄鹏飞等^[16]和 Cao 等^[17]研究结果相似。各坡度道路土壤剥蚀率为 0.92~324.46 g/(m²·min), 变幅巨大, 这是由于不同降雨和坡度条件下细沟发育程度有着巨大的差异, 细沟的形成改变了径流在路面汇集的方式, 更多径流进入细沟内, 径流剪切力、径流功率均不断增大, 这又促进了细沟的发育^[26], 导致侵蚀加剧。研究发现路面发生土壤剥蚀的临界剪切力和临界径流功率分别为 2.15 N/m²、0.41 W/(m²·s), 结果高于 Foltz 等^[29]对沙壤土道路的研究, 这是土壤容重和土壤质地差异所致, 但低于 Cao 等^[15,17]对黄土高原农田土质道路的研究, 这是由于本研究路面存在 0.5 cm 厚度浮土, 且土壤中砂粒含量也较高, 降低了土壤抗蚀性, 因此本研究土壤发生剥蚀的临界剪切力和径流功率较低。

3.3 土质道路细沟发育特征及其对侵蚀的影响

雨强为 0.5~2.5 mm/min 时, 细沟宽深比随坡度增大而减小, 这说明坡度增强了细沟内径流下切能力, 使细沟下切速度高于拓宽速度^[22,26]。研究也发现, 雨强与细沟复杂度、割裂度和密度的相关程度高于坡度 (表 5), 而沈海鸥等^[22]认为雨强对黄土坡面细沟割裂度和复杂度影响显著, 坡度对细沟宽深比和细沟密度影响更敏感, 且细沟宽深比和细沟复杂度略低于本研究, 主要是由于土壤质地和土体结构差异所致^[15], 道路坡度相对较小且土壤容重较大, 细沟发育深度较小, 在路面上形成的细沟较浅, 发育规模较小, 侵蚀强度较弱。因此, 宽深比及细沟弯曲程度 (复杂度) 较大, 而细沟的密度和坡面破碎程度 (割裂度) 则相对较低。

相关分析表明, 细沟宽深比与雨强不相关, 细沟割裂度和细沟密度与坡度不相关, 但均与二者的交互作用 ($I \times S$) 相关性极显著, 这也说明细沟发育程度不是单因素影响的结果, 而是由雨强和坡度的共同作用所致^[26]。不同雨强和坡度条件下形成了发育程度不一的细沟, 细沟形态决定了径流下切作用的强弱, 从而影响道路侵蚀强度。研究发现, 细沟发育程度越高, 土壤侵蚀量越大, 其中细沟割裂度对土质道路土壤侵蚀影响最为显著。因

此, 在进行土质道路建设时应注重道路排水方式, 道路中部应修建为微“凸”形, 防止径流汇集成股后增强对路面的切割^[30], 道路两侧应进行夯实并根据径流特征、临界剪切力和临界功率设计排水沟断面尺寸和材料, 便于路面径流分散地进入排水沟, 结果可为矿区土质道路水土保持工程措施设计及生产安全提供参数支持。

4 结 论

通过在野外建立 (3°、6°、9°、12°) 道路小区, 在不同模拟降雨强度 (0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 mm/min) 条件下研究神府矿区土质道路径流产沙规律、细沟形态特征及其对侵蚀的影响, 主要结论如下:

1) 各坡度道路径流率为 1.12~8.24 L/min, 与雨强线性关系极显著, 随坡度变化不显著; 0.5 mm/min 雨强条件下 3°~9°坡及 1.0 mm/min 条件下 3°坡土质道路径流流态为层流, 其余为紊流, 雨强-坡度交互作用 ($I \times S$) 对流态影响显著; 阻力系数只与坡度相关。

2) 各坡度道路剥蚀率为 0.92~324.46 g/(m²·s), 随雨强和坡度的增大而增大。剥蚀率与雨强、坡度和径流率呈极显著幂函数关系 ($R^2=0.968$, $P<0.01$), 道路土壤发生剥蚀的临界剪切力和临界径流功率分别为 2.15 N/m² 和 0.41 W/(m²·s)。

3) 3°道路以片状侵蚀为主, 6°~12°道路细沟发育, 细沟宽深比、复杂度、割裂度和细沟密度分别为 1.80~3.75、1.07~1.55、0.20%~10.33% 和 0.067~2.01 m/m²。坡度对细沟宽深影响高于雨强, 雨强对细沟密度、复杂度及割裂度影响高于坡度, 但均与雨强-坡度交互作用 ($I \times S$) 极显著相关 ($P<0.01$), 细沟的发育程度是雨强和坡度共同作用的结果。

4) 6°~12°道路细沟侵蚀量为 0.064~12.66 kg, 占总侵蚀量比例为 18.0%~57.16%, 细沟形态对总侵蚀量影响显著, 总侵蚀量与细沟宽深比呈递减指数函数关系 ($R^2=0.35$, $P=0.01$), 与细沟复杂度线性关系极显著 ($R^2=0.66$, $P<0.01$), 与细沟割裂度和细沟密度均呈递增的幂函数关系 ($R^2=0.96$ 和 0.73, $P<0.01$), 割裂度是影响土质道路总侵蚀量的最佳细沟形态因子。

[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.
Zhang Keli, Xu Xianli, Luo Lifang. Review and prospects on road erosion research[J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28(1): 119-123. (in Chinese with English abstract)
- [2] Dunne T. Sediment yield and land use in tropical catchments[J]. Journal of Hydrology, 1979, 42(3/4): 281-300.
- [3] Ziegler A D, Sutherland R A, Giambelluca T W. Runoff generation and sediment production on unpaved roads, footpaths and agricultural land surfaces in northern Thailand[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25(5): 519-534.
- [4] Croke J, Mockler S. Gully initiation and road-to-stream linkage in a forested catchment, southeastern Australia[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2001, 26(2): 205-217.
- [5] Ziegler A D, Giambelluca T W, Sutherland R A. Erosion prediction on unpaved mountains roads in northern Thailand:

- validation of dynamic erodibility modeling using KINEROS2[J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15(3): 337–358.
- [6] Cao L X, Zhang K L, Dai H L, et al. Modeling interrill erosion on unpaved roads in the Loess Plateau of China[J]. *Land Degradation and Development*, 2015, 26(8): 825–832.
- [7] Desprats J F, Raclot D, Rousseau M, et al. Mapping linear erosion features using high and very high resolution satellite imagery[J]. *Land Degradation and Development*, 2013, 24(1): 22–32.
- [8] Xu X L, Liu W, Kong Y P, et al. Runoff and water erosion on road side-slopes: effects of rainfall characteristics and slope length[J]. *Transportation Research Part D*, 2009, 14(7): 497–501.
- [9] Martínez-Zavala L, Jordán L A, Bellinfante N. Seasonal variability of runoff and soil loss on forest road back slopes under simulated rainfall[J]. *Catena*, 2008, 74(1): 73–79.
- [10] Dong J Z, Zhang K L, Guo Z L. Runoff and soil erosion from highway construction spoil deposits: A rainfall simulation study[J]. *Transportation Research Part D*, 2012, 17(1): 8–14.
- [11] Carlos E, Ramos S. Sediment production from unpaved roads in a sub-tropical dry setting-Southwestern Puerto Rico[J]. *Catena*, 2010, 82(3): 146–158.
- [12] 史志华, 陈利顶, 杨长春, 等. 三峡库区土质道路侵蚀产沙过程的模拟降雨试验[J]. *生态学报*, 2009, 2(12): 6785–6792.
Shi Zhihua, Chen Liding, Yang Changchun, et al. Soil loss and runoff processes on unpaved road from rainfall simulation tests in the Three Gorges Area, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 2(12): 6785–6792. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李建明, 秦伟, 左长清, 等. 黄土高原土质路浮土径流产沙模拟降雨试验研究[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(9): 2337–2345.
Li Jianming, Qin Wei, Zuo Changqing, et al. Runoff and sediment yielding for unpaved road regolith on the Loess Plateau with simulated rainfall[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(9): 2337–2345. (in Chinese with English abstract)
- [14] Damian, F. Cross-drain Placement to Reduce Sediment Delivery from Forest Roads to Streams[D]. Seattle, Washington: University of Washington, College of Forest Resources, 2003.
- [15] Cao L X, Zhang K L, Dai H L, et al. Modeling soil detachment on unpaved road surfaces on the Loess Plateau[J]. *Transactions of the ASABE*, 2011, 54(4): 1377–1384.
- [16] 黄鹏飞, 王文龙, 罗婷, 等. 非硬化土路径流侵蚀产沙动力参数分析[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 497–502.
Huang Pengfei, Wang Wenlong, Luo Ting, et al. Analysis of hydrodynamics parameters of runoff erosion and sediment-yielding on unpaved road[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(2): 497–502. (in Chinese with English abstract)
- [17] Cao L X, Zhang K L, Zhang W. Detachment of road surface soil by flowing water[J]. *Catena*, 2009, 76(2): 155–162.
- [18] 张光辉, 刘宝元, 李平康. 槽式人工模拟降雨机的工作原理与特性[J]. *水土保持通报*, 2007, 27(6): 56–60.
Zhang Guanghui, Liu Baoyuan, Li Pingkang. Principles and properties of artificial trough rainfall simulator[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(6): 56–60. (in Chinese with English abstract)
- [19] 田凤霞, 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.
Tian Fengxia, Liu Gang, Zheng Shiqing, et al. Influence of herbaceous plants on runoff hydraulic characteristics and sediment generation on terrene roads[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(10): 25–29. (in Chinese with English abstract)
- [20] 郑粉莉, 武敏, 张玉斌, 等. 黄土陡坡裸露坡耕地浅沟发育过程研究[J]. *地理科学*, 2006, 26(4): 438–442.
Zheng Fenli, Wu Min, Zhang Yubin, et al. Ephemeral gully development process at loess steep hillslope[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(4): 438–442. (in Chinese with English abstract)
- [21] Capra P P, Scicolone B. Relationships between rainfall characteristics and ephemeral gully erosion in a cultivated catchment in Sicily (Italy)[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 105(1): 77–87.
- [22] 沈海鸥, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 162–170.
Shen Haiou, Zheng Fenli, Wen Leilei, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on rill morphological characteristics[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 162–170. (in Chinese with English abstract)
- [23] Guy B T, Rudra R P, Dickenson W T, et al. Empirical model for calculating sediment-transport capacity in shallow overland flows: Model development. *Biosystems Engineering*, 2009, 103(1): 105–115.
- [24] 李君兰, 蔡强国, 孙莉英, 等. 坡面水流速度与坡面含砂量的关系[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 73–78.
Li Junlan, Cai Qiangguo, Sun Liying, et al. Relationship between the spatial distribution of flow velocity and sediment concentration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(3): 73–78. (in Chinese with English abstract)
- [25] 和继军, 孙莉英, 李君兰, 等. 缓坡面细沟发育过程及水沙关系的室内试验研究[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(10): 138–144.
He Jijun, Sun Liying, Li Junlan, et al. Experimental study on rill evolution process and runoff-sediment relationship for gentle slope[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(10): 138–144. (in Chinese with English abstract)
- [26] 和继军, 宫辉力, 李小娟, 等. 细沟形成对坡面产流产沙过程的影响[J]. *水科学进展*, 2014, 25(1): 90–97.
He Jijun, Gong Huili, Li Xiaojuan, et al. Effects of rill development of runoff and sediment yielding processes[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(1): 90–97. (in Chinese with English abstract)
- [27] 郑海金, 杨杰, 张洪江, 等. 南方红壤区农田道路强降雨侵蚀过程试验[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(9): 85–90, 98.
Zheng Haijin, Yang Jie, Zhang Hongjiang, et al. Field simulated experiment on erosion processes of different farm roads under a heavy rain in red soil region[J]. *Transactions of the Chinese society for agricultural machinery*, 2012, 43(9): 85–90, 98. (in Chinese with English abstract)
- [28] 李建明, 秦伟, 左长清, 等. 黄土区土质道路浮土侵蚀过程[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(5): 1484–1494.
Li Jianming, Qin Wei, Zuo Changqing, et al. Processes of earth road regolith erosion in loess area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(5): 1484–1494. (in Chinese with English abstract)
- [29] Foltz R B, Rhee H, Elliot W J. Modeling changes in rill erodibility and critical shear stress on native surface roads[J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(24): 4783–4788.
- [30] Nyssen J, Moeryersons J. Impact of road building on gully erosion risk: A case study from the northern Ethiopian Highlands[J]. *Earth Surface Process and Landforms*, 2002, 27(12): 1267–1283.

Runoff, sediment yield and rill development characteristic of unpaved road in mining area under field artificial simulated rainfall condition

Guo Mingming¹, Wang Wenlong^{1,2*}, Li Jianming³, Zhu Baocai^{1,4}, Shi Qianhua¹, Kang Hongliang¹, Li Yanfu⁵

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, 712100, China; 3. Department of Soil and Water Conservation, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 4. College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taigu, 030801, China; 5. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029)

Abstract: Serious man-made soil and water loss are common on unpaved roads in the mining area of Shenfu Coalfield. In general, unpaved roads are frequently rolled by transport machinery and result in massive mud after rainfall. A certain thickness of loose surface soil layer is generated after the mud is air-dried and rolled, which negatively impacts the ecological environment. An artificially simulated rainfall experiment was carried out in this study. The law of runoff and sediment yields and the characteristic of rill morphology development of unpaved road in mining area were studied at different rainfall intensities and slope degrees. According to the results of field investigations, the slope of roads usually ranged from 2° to 20° in the area and thus we set the slope of plots to 3°, 6°, 9° and 12°. Six rainfall intensities were tested, varying from 0.5 to 3.0 mm/min with an interval of 0.5 mm/min. The thickness of loose surface soil layer was set to 0.5 cm in our experiments. Plot used in the experiment was laid out to be 3 m×1 m and two flow sections were set for the measurement of runoff and sediment. Before each experiment, rainfall intensity was calibrated repeatedly until the rainfall uniformity coefficient reached 80% or higher. Soil particle composition was determined using Mastersizer 2000, whilst soil bulk density and moisture content were measured using the oven-drying method. During each experiment, flow velocity was measured with the dye tracing method. Flow width and depth were measured with a point gauge system. From 3 minutes before the runoff generation, runoff samples were taken once a minute. Other samples were taken every 3 minutes after runoff generation. All of the experiment was repeated twice. Results showed that: 1) Runoff rates varied from 1.12 to 8.24 L/min and had a significant linear relationship with rainfall intensities and no correlation with slope degrees. The Reynolds number and Resistance coefficient were 232.38-2 073.0 and 0.45-4.47, respectively. The turbulence intensity of runoff increased with the increases of rainfall intensities and slope degrees. Resistance coefficient varied significantly with slope. 2) The soil detachment rate of unpaved road ranged from 0.92 to 324.46 g/(m²·s) and was a significant power function of rainfall intensities, slope degrees and runoff rates. Critical shear stress and stream power activating sediment detachment of unpaved roads were found to be 2.15 N/m² and 0.41 W/(m²·s). 3) Sheet erosion was the main erosion form on unpaved roads with a slope degree of 3°. The rill formed on the road surface when the slope degree was greater than 3°. The rill breadth depth ratio, rill complexity degree, rill split degree and rill density were 1.80-3.75, 1.07-1.55, 0.20%-10.33% and 0.067-2.01 m/m², respectively. Overall, the rill density increased with rainfall intensity increased, rill breadth depth ratio decreased with slope degrees increased and rill complexity degree and split degree were positively correlated with the interaction of rainfall intensities and slope degrees. 4) Ratios of rill soil erosion yield to the total soil erosion yield were 18.0%-57.16%. The power function could be used to describe the relationship between total erosion yield and rill split degree and rill density. Exponential and linear functions were found to be useful to express the relationship between total erosion yield and rill breadth depth ratio and complexity degree. The results provide key parameters to the implementation of engineering soil and water conservation measures on unpaved roads and are therefore meaningful for the production safety in the mining area.

Keywords: erosion; runoff; hydrodynamics; Shenfu mining area; road; rill; morphological characteristic