

三峡库区土质道路侵蚀产沙过程的模拟降雨试验

史志华^{1,2}, 陈利顶^{2,*}, 杨长春¹, 闫峰陵¹, 彭业轩³

- (1. 华中农业大学 农业部亚热带农业资源与环境重点实验室, 武汉 430070;
2. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;
3. 湖北省秭归县水土保持局, 湖北秭归 443600)

摘要:以三峡库区王家桥小流域为研究区,通过野外调查选择了 5 个典型路段,在 1.0 mm min^{-1} 模拟降雨条件下研究了土质道路降雨-径流-泥沙关系。结果表明,土质道路被高度压实,但使用强度和管护方式差异致使容重、路面浮土、杂草盖度、饱和导水率等差异显著。土质道路仅需 $1 \sim 3 \text{ mm}$ 降雨就能产生地表径流, $7 \sim 10 \text{ mm}$ 的降雨使径流趋于稳定,径流系数超过 60%,特别是车流量较大干道的径流系数超过 70%,平均和峰值径流量达 0.69 mm min^{-1} 和 0.84 mm min^{-1} 。土质路面大量浮土致使初始径流含沙量高,然后快速下降并趋于稳定。由于路面浮土量大和在降雨过程中能形成人工细沟的车辙等导致较大车流量干道的土壤流失率是其它路段 3~4 倍。土质道路的容重和路面浮土与径流系数和土壤流失量呈显著正相关,饱和导水率则呈显著负相关;路面杂草能显著减少径流,防治路面侵蚀。

关键词:土质道路;径流;土壤流失;模拟降雨试验;三峡库区

文章编号:1000-0933(2009)12-6785-08 中图分类号:Q143 文献标识码:A

Soil loss and runoff processes on unpaved road from rainfall simulation tests in the Three Gorges Area, China

SHI Zhi-Hua^{1,2}, CHEN Li-Ding^{2,*}, YANG Chang-Chun¹, YAN Feng-Ling¹, PENG Ye-Xuan³

1 Key Lab of Subtropical Agriculture & Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 Soil and Water Conservation Bureau of Zigui County, Hubei Province 443600, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6785 ~ 6792.

Abstract: Unpaved roads are common in mountainous areas. This study examined the characteristics of surface runoff and sediment production from unpaved roads in Wangjiaqiao watershed of the Three Gorges Area of China using a simple portable rainfall simulator. 5 road segments were selected for rainfall simulation. Fifteen rainfall simulation experiments with an intensity of 1.0 mm min^{-1} were carried out on 5 road segments. Cumulative rainfall to runoff was recorded $1 \sim 3 \text{ mm}$. The runoff rate generally increased quickly and reached steady level in the first $7 \sim 10 \text{ min}$. The runoff coefficient was above 60%, with higher than 70% on the intensively used road segment. The average runoff rate and peak runoff rate were 0.69 mm min^{-1} and 0.84 mm min^{-1} , respectively. The greatest erosion was found on the intensively used road, where sediment yield average was 14.38 g L^{-1} and soil loss rate was $12.22 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$. The sediment concentration increased in the first $1 \sim 4 \text{ min}$ from the beginning of the rainfall and then decreased steadily due to the loss of fine soil surface particles and porosity changes. The soil loss rate of the intensively used road was 3 and 4 times higher than those from the infrequent traffic road. There is a relationship between sediment yield and the intensity of road usage, due to the creation of artificial rills by vehicles in the rainy periods. Statistical analysis shows that bulk density, saturated hydraulic conductivity, and dust

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40671178);国家教育部重点资助项目(108165)

收稿日期:2008-09-04; 修订日期:2009-04-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liding@rcees.ac.cn

on road surface have significant effects on runoff and soil loss. Stone cover may increase surface runoff, but vegetation cover is very effective in erosion control and runoff reduction.

Key Words: unpaved road; runoff; soil loss; simulated rainfall tests; the Three Gorges Reservoir Area

我国是一个山区占陆地面积 69% 的多山国家,交通便利是发展山区经济的一个必备条件,因此,建国以来山区道路网络得到了快速发展。1950 ~ 2000 年,围绕农村建设,特别是山区水土保持和农田基本建设,修筑了各种用途的道路 300 多万 km^[1]。限于使用目的和经济原因,这些道路以土质路面为主。作为一种特殊的土地利用方式,土质道路显著改变了下垫面土壤和水文特征,是一类不同于一般坡面、沟谷的特殊侵蚀环境。由于土质道路独特的产流产沙规律,其侵蚀已引起了许多学者的关注。早在 20 世纪 70 年代初,国外就开始了有关道路侵蚀方面的研究,针对林区水质恶化问题,道路水土流失及其对河流泥沙的影响进行了探讨^[2]。近年来,许多学者对土质道路的产流过程及机制、降雨径流泥沙关系、侵蚀防治等方面进行了大量研究^[3~8]。20 世纪 50 年代中国科学院在黄土高原水土保持科学考察时就已经提出道路侵蚀的严重性^[9]。20 世纪 50 年代以来,郑世清等对黄土高原典型小流域道路侵蚀特征及其影响因素进行了分析^[10],并提出了一些道路防治体系设计方案及其配套措施^[11]。曹世雄等对土质路面种草防蚀进行了研究^[1]。道路水土流失的研究虽然取得了长足进步,仍然存在其侵蚀机理还不明确,还没有被普遍接受和应用的预报模型^[12]。

三峡库区在生态环境建设与移民过程中修建了大量土质道路。库区地处大巴山断褶带、川东褶皱带和川鄂湘黔隆起褶皱带 3 个构造单元的交汇处,复杂自然条件导致土质道路的路面类型多样,但有关库区土质道路的侵蚀规律还未见报道。鉴于水沙问题对三峡水库的重要性,本文以三峡库区王家桥小流域为研究区域,选择不同类型路面的土质道路,在人工模拟降雨条件下,定量研究土质道路侵蚀规律。以期阐明三峡库区典型土质道路降雨-径流-泥沙关系,为道路侵蚀模型构建及其水土流失防治提供科学依据。

1 研究区域

野外试验在湖北省秭归县王家桥小流域内进行。该流域地处 31°12'N, 110°42'E, 长江二级支流, 出口距三峡大坝约 50km (图 1), 面积 16.7 km², 人口密度为 307 人/km²。流域坡度陡峭, 海拔在 184 ~ 1180m 之间, 属典型山区小流域。气候属中亚热带大陆性季风气候, 年均温 18.0℃, 降水量 1013mm, 集中性暴雨易造成山洪灾害。母岩为侏罗系上统的蓬莱镇组, 以紫色砂页岩为主, 夹少量泥岩。土壤类型主要有紫色土和水稻土。植被以针阔叶混交林为主, 主要树种有马尾松 (*Pinus massoniana*)、杉 (*Cunninghamia lanceolata*)、栎 (*Quercus serrata* var. *brevipetiolata*) 等; 灌木以马桑 (*Coriaria sinica*)、荆条 (*Vitex negundo*) 等常见。农作物以水稻 (*Oryza sativa*)、小麦 (*Triticum aestivum*)、玉米 (*Zea mays*)、油菜 (*Brassica napus*)、马铃薯 (*Ipomoea batatas*) 为主; 柑橘 (*Citrus sinensis*) 是主要经济作物。流域资源利用及发展模式在三峡地区具有广泛的代表性。

2 野外试验

2.1 径流小区准备

野外工作在 2007 年 4 ~ 7 月间进行。首先, 以流域 1:1 万航片和地形图为基础, 通过实地调查获取了流域土质道路分布及其路面基本状况, 其中土质道路总长为 30.39km, 修筑时间都在 10a 以上, 路面宽度多在 3 ~ 6m, 坡度 4 ~ 11° 间。其次, 在调查基础上选择流域内有代表性的 5 个路段, 分别记为 R1、R2、R3、R4 和 R5, 其中, R1 是主干道到单个农户的道路, R2 和 R3 是连接主干道和村落间的道路, R4 和 R5 是位于流域的主干道。每个路段建立 3 个临时径流小区, 小区大小为 2.0 m × 1.0 m, 在尽量不破坏路面的前提下, 用混凝土切割机切开路面, 将厚度为 2 cm, 高 20 cm 的木板嵌入路面 10 cm 作为隔水墙, 分隔小区内外径流, 小区下设集流装置, 定时采集径流。

2.2 野外试验

小区碎石和杂草盖度测定是在降雨前采用数码相机垂直小区坡面方向进行图像采集, 然后采用 ERDAS

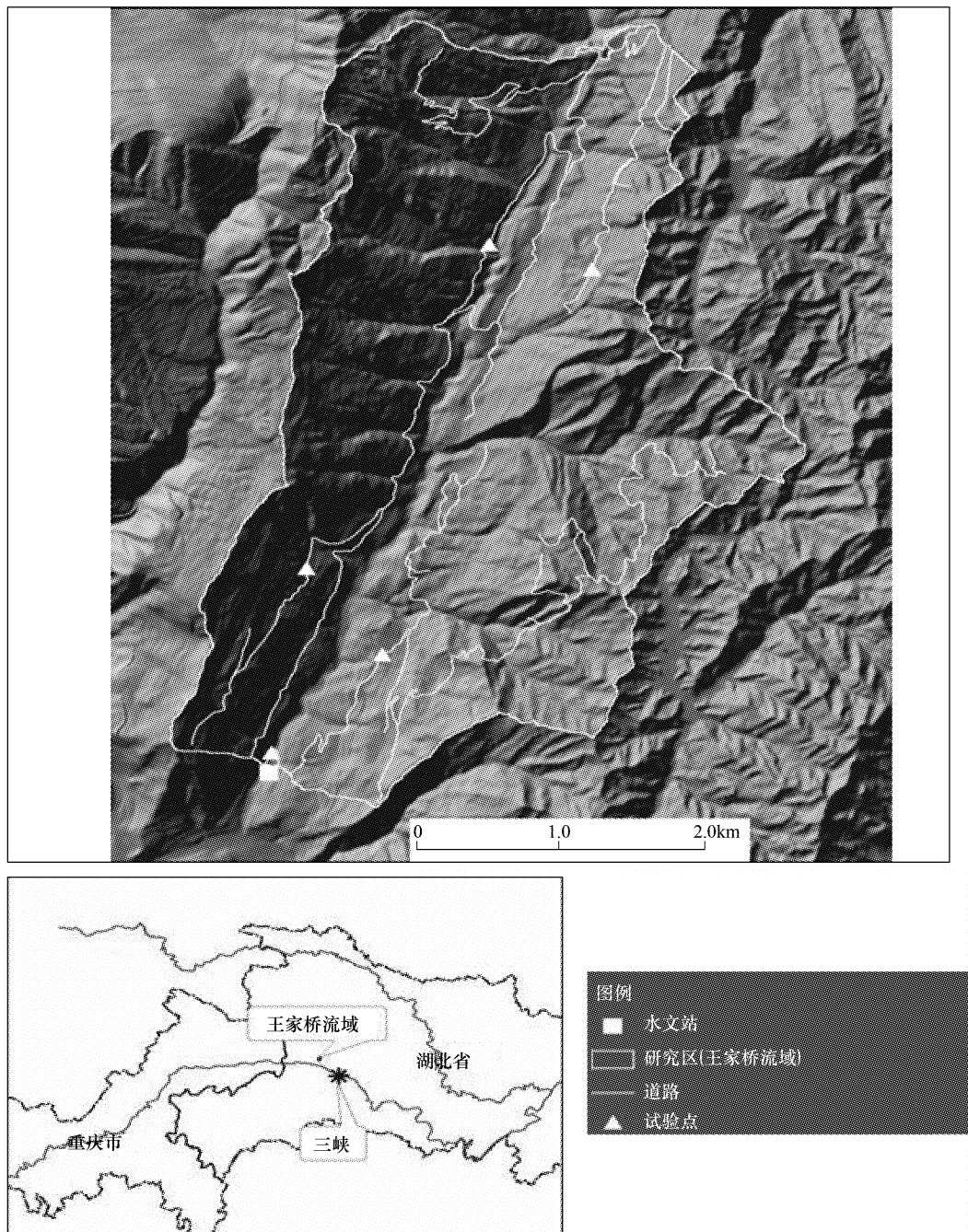


图1 王家桥流域及其研究道路点示意图

Fig. 1 Location of the Wangjiaqiao watershed and study site

对图像进行分类处理测定碎石和杂草盖度,最后结合经验目测对碎石和杂草的盖度进行验证。路面浮土用 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 薄铁皮矩形框轻轻按入路面,然后用软质羊毛刷仔细收集框内浮土,过 20 目土壤筛剔除碎石,称重并测定水分。小区坡度采用罗盘测定,土壤性质采用常规分析方法,即饱和导水率采用 Guelph 入渗仪,容重采用环刀法,机械组成采用吸管法^[13]。

模拟降雨器采用 SPRACO 锥形喷头,喷头距地面垂直高度 4.75m,供水压力 0.08MPa,模拟降雨动能约为等雨强天然降雨的 90%,均匀度约 0.9。根据流域长期气象观测资料,选择出现频率较高的侵蚀性降雨,雨强为 $(1.0 \pm 0.07)\text{ mm min}^{-1}$,雨滴中数直径为 2.4 mm,降雨动能为 $0.5 \sim 0.6\text{ J m}^{-2}\text{ S}^{-1}$ ^[14],时间控制在 30 min。降雨过程中,记录产流时间,产流后每 3 min 采集 1 次径流样,记录径流体积,并通过烘干称重法测定径流泥

沙含量。径流系数通过径流总量、降雨历时及雨强求得;土壤流失量通过径流量和径流泥沙含量求得。实验数据采用 SPSS 软件进行统计分析。

3 结果与讨论

3.1 典型路面土壤物理基本特征

各个试验点的坡度没有明显差异,大约在 $5 \sim 9^\circ$ 之间,土壤质地均为砂壤土(表 1)。与耕地、林草地、荒地等相比,土质道路的路面被高度压实,容重大,饱和导水率低,但碎石盖度、杂草盖度、路面浮土量、容重和饱和导水率差异显著。与 R4 和 R5 相比,R1 的容重要小 25%,饱和导水率是它们的 4 倍,路面浮土量仅 0.05 kg m^{-2} 。R1、R2 和 R3 的碎石盖度均在 20% 左右,无明显差异,R4 和 R5 碎石盖度是其它 3 个试验点的 2 倍。杂草覆盖度以 R1 最大,达 34.4%,大约是 R2 和 R3 的 2 倍,R4 和 R5 的杂草覆盖度低于 10%。

试验点的路面状况差异主要是由于各个路段的使用强度和管护方式不同造成。R1 是一条从主干道到单个农户的道路,车流量很少,只有少量人畜践踏,因此,路面浮土量较小,容重相对较轻,且路面杂草生长良好,覆盖度较高;R2 和 R3 是连接主干道和村落间的道路,相对 R1 而言,车流量大,人畜践踏更频繁。R4 和 R5 位于流域内主干道上,车流量很大,路面紧实度更高,容重接近 2.0 g cm^{-3} ,较大车流量也导致路面浮土量高;同时,R4 和 R5 每年有多次用碎石和土壤混合对路面进行维护,因此,碎石盖度较高。R4 和 R5 的饱和导水率极小原因是:① 路面压实,容重增加减少了土体中大孔隙;② 碎石的存在改变了土壤水分的运动通道和过水断面,饱和导水率随碎石含量先减小而后增大,一般碎石含量 40% ~ 50% 时饱和导水率达到最低^[15]。

表 1 试验小区情况及其土壤性质

Table 1 Characterization of the experimental plots and its soil characteristics

路段编号 Road code	R1	R2	R3	R4	R5	P
坡度 Slope ($^\circ$)	7.33a	5.87a	6.54a	7.58a	8.16a	0.574
碎石盖度 Stone cover (%)	21.2a	19.6a	20.8a	37.6b	42.5b	0.009
杂草盖度 Plant cover (%)	34.4a	17.6b	14.1b	5.2c	4.3c	0.000
路面浮土 Dust on road surface (kg m^{-2})	0.05a	0.19b	0.15b	0.33c	0.27c	0.000
容重 Soil bulk density (g cm^{-3})	1.58a	1.65b	1.72b	1.92c	1.96c	0.003
饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity (mm h^{-1})	8.65a	5.38b	4.96b	2.47c	2.23c	0.000
砂粒 Sand (g kg^{-1})	628a	609a	507b	528b	520b	0.007
粉粒 Silt (g kg^{-1})	249a	242a	369b	320b	338b	0.014
粘粒 Clay (g kg^{-1})	123a	149a	124a	152a	140a	0.219

同一列中字母不同表示达到 P 为 0.05 显著差异 Different letters in the same column mean difference of significance at $P < 0.05$

3.2 土质道路的产流特征

图 2 是 5 个典型路段产流过程曲线。由图可知,5 个试验路段的产流规律较为一致,产流速度快,产流前的累积降雨量只有 1 ~ 3 mm(表 2)。产流后径流量快速增加,并在 4 ~ 7 min 内(累计降雨量约在 7 ~ 10 mm)径流趋于平稳。稳定产流率较高,最小的 R1 也高达 0.66 mm min^{-1} ,而车流量较大的主干道 R4 和 R5 的稳定产流率在 $0.8 \sim 0.85 \text{ mm min}^{-1}$ 。

表 2 试验点径流特征的关键参数对比

Table 2 Cumulative rainfall to runoff, runoff flow, maximum runoff, and runoff coefficient

路段编号 Road code	R1	R2	R3	R4	R5	P
产流前累计降雨量 Cumulative rainfall to runoff (mm)	2.63a	1.75a	1.67a	1.27a	1.19a	0.129
平均径流量 Average runoff (mm min^{-1})	0.45a	0.52b	0.56b	0.66c	0.69c	0.006
峰值径流量 Peak Runoff (mm min^{-1})	0.61a	0.66b	0.71b	0.82c	0.84c	0.009
径流系数 Runoff coefficient (%)	58.8a	61.2a	64.7a	74.2b	76.7b	0.034

同一列中字母不同表示达到 P 为 0.05 显著差异 Different letters in the same column mean difference of significance at $P < 0.05$

表 2 是各试验点径流特征主要参数。产流时间是描述产流特征的一个重要指标,但实验中降雨强度有一

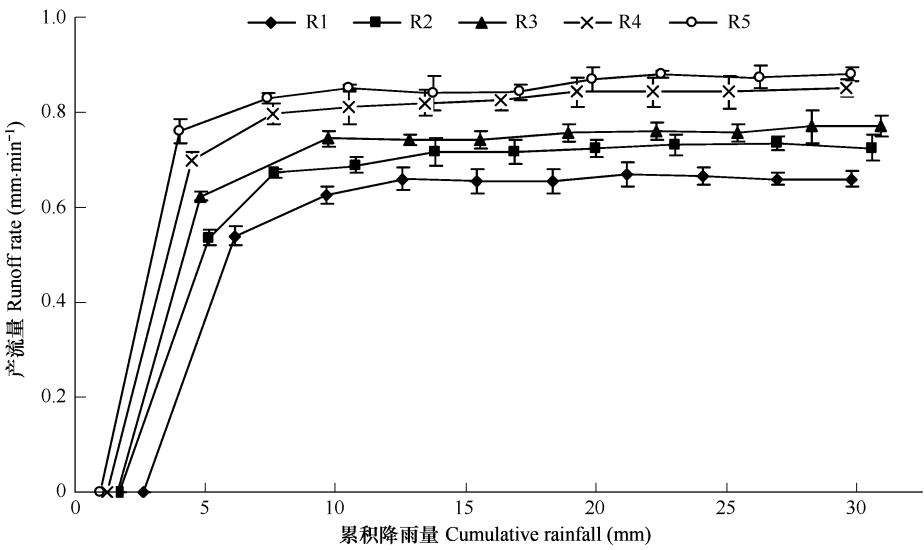


图2 不同试验点的产流过程曲线
Fig. 2 Runoff rate curves for selected five sites under simulated rainfall

定的变异,因此,利用测定的雨强与产流时间换算成产流前累计降雨量以便更直观对比。5个点的产流前累计降雨量均小于3mm,虽无统计上的差异($P=0.129$),但R1要高于其他点。这主要与路面杂草盖度有关,产流前累计降雨量与小区杂草盖度相关系数达0.894 ($P<0.001$)。R4和R5高达 1.9 g cm^{-3} 的容重,导致降雨入渗低,平均径流系数最高,分别达74.2%和76.7%,其范围在71.4%~81.3%。此外,R4和R5较高的碎石盖度可能也会导致径流系数升高^[16]。R1、R2和R3的径流系数在60%左右,比R4和R5低15%~30%。平均径流量和峰值径流量趋势一致,R1的分别为 0.45 mm min^{-1} 和 0.61 mm min^{-1} ,显著低于其它4个试验点,与最大的R5相差分别为54.2%和42.7%。

3.3 土质道路的产沙过程

表3是5个试验路段在相同的降雨条件下的侵蚀产沙特征。从表3可以看出,R1路段的平均泥沙浓度、最大泥沙浓度和土壤流失率分别为 3.39 g L^{-1} 、 9.47 g L^{-1} 和 $2.58\text{ g m}^{-2}\text{ min}^{-1}$,显著低于其它路段。R4和R5的平均泥沙浓度是R1路段的4~5倍,最大泥沙浓度接近3倍,而土壤流失率则达3~4倍。

表3 不同试验点的产沙特征
Table 3 Sediment yields of simulated rainfall experiments

路段编号 Road code	R1	R2	R3	R4	R5	ANOVA, P
平均泥沙浓度 Sediment concentration (g L^{-1})	3.39a	6.24b	6.94b	14.38c	11.82c	<0.001
最大泥沙浓度 Peak of sediment (g L^{-1})	9.47a	20.76c	15.20b	25.88c	23.71c	<0.001
土壤流失率 Soil loss rate ($\text{g m}^{-2}\text{ min}^{-1}$)	2.58a	5.12b	6.11b	12.22c	10.05c	<0.001

同一列中字母不同表示达到 P 为0.05显著差异 Different letters in the same column mean difference of significance at $P<0.05$

图3是5个试验点的径流含沙量变化过程曲线。降雨过程中,首先是雨滴的击溅侵蚀,但对土质道路这类硬下垫面而言,溅蚀量较小且搬出坡面的溅蚀泥沙几乎为零且无径流,因而含沙量为零。当坡面积水产流后,开始泥沙的输移和搬运,亦即在坡面形成水沙二相流。从图3可看出,未产流时含沙量为零,产流开始后含沙量很高,然后快速下降。这是因为产流刚开始时,路面有大量浮土,这些浮土在雨滴击溅作用下更加分散,当路面出现径流时便冲刷和搬运这些浮土,从而出现高含沙量的现象。特别是在浮土量较高的R4和R5,产流初期泥沙含量为平稳期2~4倍。随着径流量增加,当这些浮土搬运完后,泥沙含量急剧降低。径流稳定后,所有路段的含沙量波动不大。这主要是由于本试验的径流小区面积较小($2.0\text{ m}\times 1.0\text{ m}$),较短坡长(2m)导致上坡汇水面积小,因此,径流冲刷能力相对较小,而土质路面被高度压实,抗冲能力相对较大,抗冲

力和冲刷力差值在较小的范围内变动或者其差值趋于稳定,在含沙量上表现其增量接近于零。路面特征差异对径流含沙量作用明显,在浮土含量较少、杂草盖度较高的 R1、R2 和 R3 路段,尤其是 R1 路段,在整个降雨过程中含沙量要明显低于 R4 和 R5,与径流过程较为一致。此外,R4 和 R5 试验点位于流域主干道上,较大车流量导致路面易形成车辙,这些车辙在降雨过程中形成的人工细沟致侵蚀强度要高于其它路段^[17,18]。

3.4 土质路面特性对产流产沙影响

关于一般坡面的径流与侵蚀产沙的影响因子研究已经很多,概括起来主要包括 3 个方面,即下垫面性质、气候因素、人为干扰等因子对径流产沙的影响^[19]。在降雨一致条件下,本文重点探讨不同类型的路面,即下垫面性质对土质道路的径流产沙影响(表 4)。

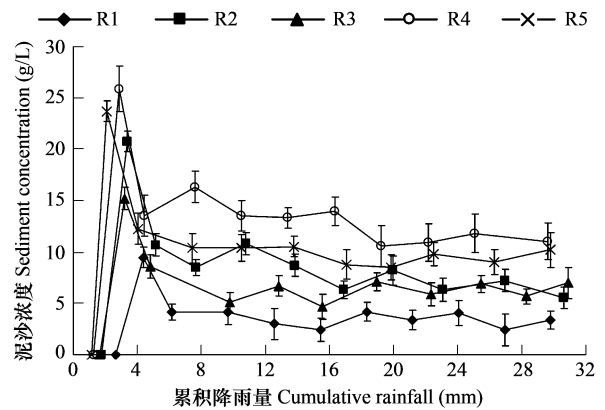


图3 降雨过程中泥沙含量变化

Fig. 3 Sediment concentration for selected five sites during simulated rainfall

表 4 土质路面特性与径流泥沙的相关性统计分析

Table 4 Correlation between site characteristics and runoff and/or sediment

路面特性 Site characteristics	径流系数 Runoff coefficient (%)		土壤流失量 Soil loss rate (g m ⁻² min ⁻¹)	
	R	P	R	P
坡度 Slope	0.068	0.809	0.378	0.241
土壤容重 Soil density	0.698	0.004	0.783	0.001
杂草盖度 Plant cover	-0.735	0.002	-0.832	0.000
碎石盖度 Stone cover	0.740	0.002	0.498	0.059
饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity	-0.815	0.000	-0.673	0.006
路面浮土量 Dust on road surface	0.611	0.016	0.882	0.000

就土质道路而言,坡度相对较缓,一般在 5~10°范围内,且研究中选择的路段坡度无显著差异(表 1),因此,对径流产沙的影响较小($P > 0.05$)。但不能简单地认为坡度的变化对土质道路的径流产沙没有影响,这方面仍有待进一步研究。土壤容重越大,路面越压实,抵抗侵蚀能力越强。但在同时也减少降雨入渗,增加径流量,加快径流流速,径流冲刷力增大,从而导致了径流和产沙量增加,因此,土壤容重与径流系数和土壤流失量均呈显著正相关。碎石盖度与径流系数之间有显著相关关系,已有研究也表明碎石覆度增加能显著增加径流^[16],但对侵蚀影响还有待进一步研究。曹世雄等^[1]在黄土土质路面研究发现,路面种草后径流量减少 46.15%~69.30%,土壤侵蚀量减少 54.53%~77.80%,本研究也证明了路面杂草能显著减少径流,防治路面侵蚀。饱和导水率是路面积水后,反映降雨入渗能力的指标,其值越大入渗能力越强,径流越小,径流冲刷也随之下降,因此,它与径流系数和土壤流失量之间有显著的负相关。路面浮土量不仅与土壤流失量有极显著相关,而且与径流系数之间也达到显著水平。其原因是为产流前浮土在雨滴击溅作用下更加分散并形成结皮,结皮的形成能显著地减小路面入渗能力,导致径流快速发生;产流后浮土容易被冲刷和搬运,从而出现初期径流的高含沙量现象^[17]。

4 结论

(1)与耕地、林草地、荒地等相比,土质道路被高度压实,容重大、饱和导水率低。但使用强度和管护方式差异致使土质道路的容重、路面浮土、杂草盖度、饱和导水率等差异显著。车流量高的干道容重 $>1.9\text{ g cm}^{-3}$,饱和导水率 $<2.5\text{ mm h}^{-1}$,路面浮土量在 $0.27\sim0.33\text{ kg m}^{-2}$ 。与其相比,连接干道与村落的道路,车流量较少,容重要小 15%~25%,路面浮土量仅 $0.05\sim0.19\text{ kg m}^{-2}$,饱和导水率是干道的 2~4 倍,而杂草盖度要高一个数量级。

(2)被高度压实的土质道路产流速度快,仅 1~3 mm 降雨量就能够导致路面产生径流,7~10 mm 的降雨量使径流趋于稳定,径流系数超过 60%,特别是流域干道上 R4 和 R5 试验点的径流系数超过 70%,平均和峰值径流量可高达 0.69 mm min^{-1} 和 0.84 mm min^{-1} ,比最小的路段高 50% 和 40%。

(3)由于土质路面有大量浮土,当路面出现径流时便冲刷和搬运这些浮土,从而出现初始径流含沙量高,然后快速下降并趋于稳定。由于路面浮土量大和在降雨过程中形成人工细沟的车辙等原因导致使用强度较高干道的平均泥沙浓度是其它路段的 2~4 倍,最大泥沙浓度高于其它路段 30%~150%,而土壤流失率则达 3~4 倍。

(4)土质道路的容重和路面浮土与径流系数和土壤流失量呈显著正相关,饱和导水率与径流系数和土壤流失量之间有显著的负相关关系,碎石盖度与径流系数均呈显著正相关。路面杂草能显著减少径流,防治路面侵蚀。

此外,本研究只涉及路域尺度,而道路侵蚀更重要的是水沙异源,因此,研究尺度上还有待进一步扩展。如利用天然降雨资料,系统分析和研究较大尺度上道路水沙异源侵蚀的特点,进一步阐明道路侵蚀机理,为道路侵蚀模型构建及其水土流失防治提供科学依据。

References:

- [1] Cao S X, Chen L, Gao W S. Planting grass on rural roads in loess hilly-gully. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1754—1763.
- [2] Fransen P J B, Phillips C J, Fahey B D. Forest road erosion in New Zealand: overview. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(2): 165—174.
- [3] Ziegler A D, Giambelluca T W. Importance of rural roads as source areas for runoff in mountainous areas of northern Thailand. *Journal of Hydrology*, 1997, 196(1-4): 204—229.
- [4] Amaez J, Larrea V, Ortigosa L. Surface runoff and soil erosion on unpaved forest roads from rainfall simulation tests in northeastern Spain. *Catena*, 2004, 57(1): 1—14.
- [5] MacDonald L H, Sampson R W, Anderson D M. Runoff and road erosion at the plot and road segment scales, US Virgin Islands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(3): 251—272.
- [6] 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. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25(5): 519—534.
- [7] Jordan A, Martinez-Zavala L. Soil loss and runoff rates on unpaved forest roads in southern Spain after simulated rainfall. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(3-4): 913—919.
- [8] Kolka R K, Smidt M F. Effects of forest road amelioration techniques on soil bulk density, surface runoff, sediment transport, soil moisture and seedling growth. *Forest Ecology and Management*, 2004, 202(1-3): 313—323.
- [9] Chinese Academy of Sciences. Soil and water conservation in the west of Shanxi Province. Beijing: Science Press, 1957.
- [10] Zheng S Q, Zhou B L, Zhao K X. Valley-slope road erosion and its control measures in Wangdong Gully experimental area located in Changwu County. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1994, 8(3): 29—35.
- [11] Zheng S Q, Huo J L, Li Y. Hilly road erosion and control on loess plateau region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2004, 24(1): 46—48.
- [12] Luce C H. Hydrological processes and pathways affected by forest roads: what do we still need to learn? *Hydrological Processes*. 2002, 16(14): 2901—2904.
- [13] The Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil Physical and Chemical Analysis. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978.
- [14] Luk S H, Abrahams A D, Parsons A J. A simple rainfall simulator and trickle system for hydro-geomorphic experiments. *Physical Geography*, 1986, 7(3): 344—356.
- [15] Zhou B B, Shao M A. Study on Saturated Hydraulic Conductivity of Soil Stone Mixtures. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6): 62—66.
- [16] Poesen J, Ingelmo S F, Mucher H. The hydrological response of soil surface to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top

layer. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1990, 15(7): 653—671.

- [17] Ziegler A D, Sutherland R A, Giambelluca T W. Interstorm surface preparation and sediment detachment by vehicle traffic on unpaved mountain roads. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(3): 235—250.
- [18] Reid L M, Dunne T. Sediment production from forest road surfaces. *Water Resource Research*, 1984, 20 (11): 1753—1761.
- [19] Wei W, Chen L D, Fu B J, Gong J. Mechanism of soil and water loss under rainfall and earth surface characteristics in a semiarid loess hilly area. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3847—3853.

参考文献:

- [1] 曹世雄, 陈莉, 高旺盛. 在黄土丘陵区土质路面种草. *生态学报*, 2005, 25(7): 1754~1763.
- [9] 中国科学院黄土高原地区科学考察队. 山西西部水土保持调查报告. 北京: 科学出版社, 1957.
- [10] 郑世清, 周保林, 赵克信. 长武王东沟实验区沟坡道路侵蚀及其防蚀措施. *水土保持学报*, 1994, 8(3): 29~35.
- [11] 郑世清, 霍建林, 李英. 黄土高原山坡道路侵蚀与防治. *水土保持通报*, 2004, 24(1): 46~48.
- [13] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [15] 周蓓蓓, 邵明安. 土石混合介质饱和和导水率的研究. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 62~66.
- [19] 卫伟, 陈利顶, 傅伯杰, 巩杰. 半干旱黄土丘陵沟壑区降水特征值和下垫面因子影响下的水土流失规律. *生态学报*, 2006, 26(11): 3847~3853.