

# 黄土道路侵蚀过程模拟试验研究

田风霞<sup>1,3</sup>, 王占礼<sup>1,2</sup>, 郑世清<sup>1,2</sup>, 马春艳<sup>2</sup>

(1. 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; 2. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 黄土地区土质道路侵蚀强烈, 严重影响当地的生产与交通事业。开展黄土道路侵蚀研究, 对于黄土地区水土保持与生态经济建设具有重要意义。采用模拟降雨试验方法研究了黄土道路侵蚀过程, 取得了如下结果。(1) 道路径流侵蚀发生时间随雨强及坡度的变化皆可用幂函数方程描述;(2) 道路径流侵蚀开始时含沙量很高, 但很快下降并随降雨历时的延长而逐渐趋于相对稳定;(3) 道路侵蚀率变化过程可分为 3 个阶段: 径流侵蚀开始至 20 min 及 40 min 至侵蚀过程结束, 侵蚀率随降雨过程的变化较大, 20~40min 之间基本稳定;(4) 道路侵蚀模数随雨强及坡度的变化均可用幂函数方程描述, 雨强及坡度对道路侵蚀的综合影响可用二元线性方程描述。

**关键词:** 黄土道路; 道路侵蚀; 侵蚀过程

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)02-0001-04

中图分类号: S157. U418.54

## Experiment Modeling of Soil Erosion Processes on Loess Roads Based on Simulated Experiment

TIAN Feng-xia<sup>1,3</sup>, WANG Zhan-li<sup>1,2</sup>, ZHENG Shi-qing<sup>1,2</sup>, MA Chun-yan<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Road erosion in the loess region is a severe problem which influences traffic, transportation and agricultural activities etc. Research on road erosion is very important to soil and water conservation, ecology construction and economy development in the region. Based on simulated rainfall experiments, erosion processes on loess roads are studied, and following results are obtained. (1) The variations of starting time of soil erosion by runoff with rainfall intensity and slope gradient can be respectively described with exponential equations. (2) The sediment concentration is very high in the initial stage of soil erosion processes by runoff on road. However, the concentration decreases very quickly, and then gradually becomes relative steady in continued rainfall processes. (3) The variation of road erosion rate can be divided into three stages during which the variation of erosion rate with rainfall process is great from the commence of soil erosion by runoff to 20 min, and from 40min to the end of runoff erosion processes, and is relatively steady from 20 min to 40 min. (4) The variations of road erosion modulus with rainfall intensity and slope gradient can be described with exponential equations, respectively, and the integrated effects of rainfall intensity and slope gradient on road erosion can be described with a binary linear equation.

**Keywords:** loess road; road erosion; erosion processes

黄土土质道路是我国黄土地区等级公路之外的重要交通、运输通道, 广泛分布在乡、村及地块之间, 在各种农业生产与经济建设活动中具有极其重要的作用。黄土道路侵蚀是黄土地区普遍存在的一种侵蚀程度相当严重的侵蚀类型。黄土道路经长期人畜

践踏和车辆碾压后路面下凹, 成为周围坡面径流汇集与输送的通道, 加之该区黄土土层深厚、抗侵蚀能力差, 因此, “千年道路变成河”就成为这里道路侵蚀程度强烈的深刻比喻。黄土道路侵蚀破坏道路土地资源, 影响交通出行条件与环境, 产生洪水与泥沙等灾

收稿日期: 2006-11-20

修稿日期: 2007-01-16

资助项目: 中国科学院水利部水土保持研究所“领域前沿科研专项经费资助项目”(SW05105); 国家 973 计划课题(2007CB407201); 国家自然科学基金重点项目专题(40335050-1); 西北农林科技大学“创新团队建设计划”项目; 西北农林科技大学青年专项资助

作者简介: 田风霞(1982-), 女(汉族), 山东省济宁人, 硕士生, 研究方向为土壤侵蚀过程。E-mail: fxt0130@163.com。

通讯作者: 王占礼(1960-), 男(汉族), 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀过程及预报模型研究。E-mail: zwang@nwsuaf.edu.cn。

害,严重制约当地的经济与社会发展。开展黄土道路侵蚀过程研究,可为黄土地区水土保持与生态建设及经济社会可持续发展提供重要科学依据,并促进坡面土壤侵蚀理论进一步发展。

我国对道路侵蚀的认识和研究始于李仪祉先生,他强调修治道路是治理水土流失的重要措施。后来,朱显谟院士研究了道路侵蚀与沟谷发育的关系<sup>[1]</sup>,孙建轩<sup>[2]</sup>、邱荣祖等分别研究了山区道路<sup>[3-5]</sup>、山地林道的水土流失防蚀措施。郑世清等在陕西省长武县对黄土高原沟壑区的道路侵蚀与防治问题进行了定位观测研究<sup>[6-8]</sup>。本文采用室内道路模型人工降雨试验方法,试图模拟和阐明黄土道路侵蚀规律。

## 1 材料与方法

试验在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模拟降雨大厅完成。试验用土为取自陕西省延安地区的黄绵土,前期土壤含水量为 10%,土壤容重为 1.35 g/cm<sup>3</sup>,通过分层计量填装,达到试验槽断面土壤容重一致。试验土槽长 200 cm,宽 55 cm,深 35 cm,装土深 33 cm,置于自行设计的可调坡度拖车上。本试验由同一坡度(15°),不同雨强(0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 mm/min)和同一雨强(2.0 mm/min),不同坡度(6°, 9°, 12°, 15°, 18°)的 10 场试验组成,每场试验重复一次,总共进行试验 20 次。

各次试验的降雨历时为 60 min,详细观测试验全过程,开始产流后,前 5 min 每隔 2 min, 3 min 观测一次,以后每隔 3 min 观测一次,用编号采样桶分别收集各时段全部浑水径流,降雨结束后用量筒量测各采样桶收集的浑水体积,经数小时静置后,撇去清水,将含水泥沙置于烘样盒中,在 105℃ 下于烘箱中烘干,随后称取,计算出烘干土重,最后通过计算获得侵蚀率和侵蚀模数。

## 2 结果与分析

### 2.1 道路侵蚀开始发生时间随雨强及坡度的变化

任何雨强及坡度条件下,降雨与侵蚀事实上同时开始发生,但由于溅蚀的作用主要是分离土壤,对造成土壤流失意义不大,所以,这里所指的侵蚀开始发生时间主要针对径流侵蚀而言,实际上也是侵蚀方式由单独溅蚀转化为溅蚀与径流侵蚀共存,并以径流侵蚀为主开始发生的时间。

在前期土壤非饱和及持续降雨条件下,当土壤入渗率开始小于降雨强度时,坡面开始产流。土壤是松散物质,黄土质地更加疏松,虽然黄土路面硬,容重

大,但由于黏性较差,因此,与非硬地面一样,仍然是一有受雨滴打击扰动的径流发生,必然同时伴随着土壤的流失。而且由于降雨前期,路面人为扰动远远大于非道路区,路面处于分离状态的土壤物质积累较多,加之降雨开始后雨滴打击的进一步分离作用,因此,开始产流时,虽然径流率小,含沙量却一般都高。因此,分析研究侵蚀开始发生时间在不同影响因素条件下的变化规律对于完整地理解和认识侵蚀发生发展过程具有重要作用。

图 1 及图 2 分别是道路侵蚀开始发生时间随雨强及坡度的变化。统计分析表明,侵蚀开始发生时间随雨强及坡度的变化皆可用幂函数相关方程表述,相关方程分别为:

$$T_p = 11.959I^{-2.178}, \quad R = -0.92 \quad (1)$$

$$T_p = 19.637S^{-0.942}, \quad R = -0.97 \quad (2)$$

式中:  $T_p$ ——侵蚀开始时间(s);  $I$ ——雨强(mm/min);  $S$ ——坡度(°)。

式(1)与式(2)所体现的侵蚀开始发生时间与雨强及坡度的负相关关系表明,雨强及坡度的变化不仅影响侵蚀大小变化,而且在侵蚀时间长短变化中也有相应的响应,其中,式(1)也与王玉宽,张光辉等的模拟降雨试验研究结果接近<sup>[9-10]</sup>。

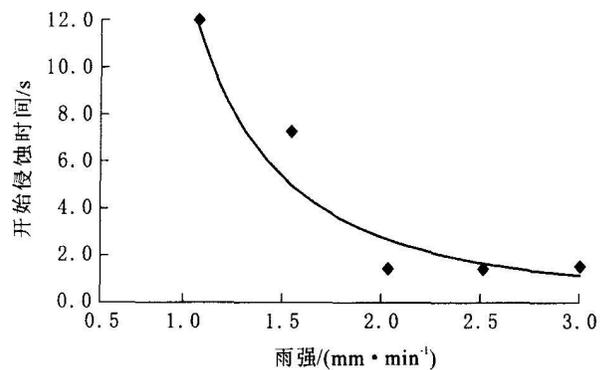


图 1 侵蚀开始时间随雨强变化

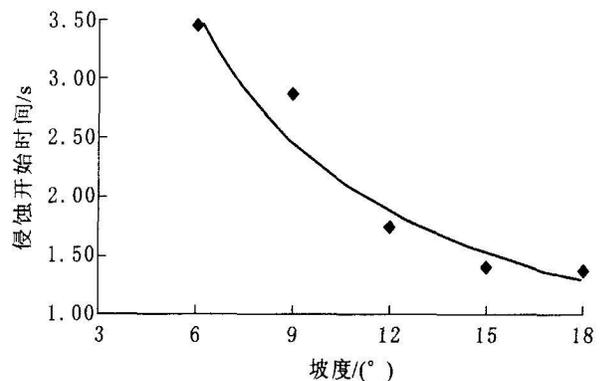


图 2 侵蚀开始时间随坡度变化

## 2.2 道路侵蚀含沙量变化过程

侵蚀过程中的含沙量变化是水沙关系演变的重要指标。图3是坡度为 $15^\circ$ 不同雨强降雨条件下含沙量随降雨过程的变化。图3表明,各种雨强条件下,产流开始时含沙量总体很高,但都很快下降并随降雨历时的延长而逐渐趋于相对稳定的延续过程,这3个小于强条件下,25 min以后基本稳定,这2个大雨强条件下15 min以后就基本稳定。

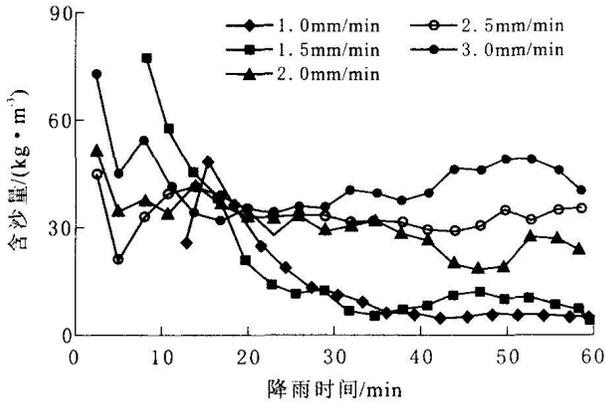


图3 含沙量随降雨过程的变化

由于产流初期,坡面表层在产流前期雨滴击溅分散作用下有一些散碎土粒,这些土粒在产流出现时的雨滴击溅与径流作用下更加分散,当坡面出现的径流冲刷和搬运这些土粒时,自然就出现了径流量小但含沙量高的现象。随着降雨过程的进行,受产流前期条件的影响逐步减弱,在坡面形态条件不发生明显变化的前提下,含沙量当然逐步趋于稳定。大雨强条件下,侵蚀过程可以较早地减弱产流前期条件的影响,所以含沙过程趋于相对稳定的时间较早,而小雨强条件下,由于侵蚀过程中产流前期条件影响的时间较长,所以,含沙过程趋于相对稳定的时间较晚。

经对3个较小雨强条件下含沙量随降雨过程的变化进行分析表明,3个雨强条件下含沙量随降雨过程的变化均可用幂函数相关方程描述:

$$S_{C1} = 2578.80 T^{-1.59}, \quad R = 0.9427 \quad (3)$$

$$S_{C2} = 928.08 T^{-1.25}, \quad R = 0.8972 \quad (4)$$

$$S_{C3} = 63.83 T^{-0.24}, \quad R = 0.8057 \quad (5)$$

式中:  $S_{C1}$ ,  $S_{C2}$ ,  $S_{C3}$ ——分别为雨强在0.5, 1.0, 1.5 mm/min条件下的含沙量( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $T$ ——降雨历时(min)。

## 2.3 道路侵蚀率变化过程

图4是坡度为 $15^\circ$ ,不同雨强条件下道路侵蚀率随降雨过程的变化。图4表明,不同雨强条件下的道路侵蚀率变化过程总的可分为3个阶段:开始降雨后

的20 min以前及40 min以后,侵蚀率随降雨过程的变化较大,20~40 min之间侵蚀率随降雨过程变化基本稳定。20 min以前各雨强条件下的侵蚀率变化表现为升降波动,其中,最大雨强条件下升、降历时基本相等,其余各雨强条件下则皆以长时间上升和短时间下降为主,各雨强条件下下降的结果都是达到第二阶段的侵蚀率。40 min以后各雨强条件下的侵蚀率变化也表现为升降波动,其中,2个最小雨强及2个最大雨强条件下,表现为长时间的上升及很短时间的下降,上升的结果是使该阶段的侵蚀率进一步超越了第二阶段的侵蚀率,中等雨强条件下则为等幅度的升降,波动的结果使该阶段侵蚀率的平均值低于第二阶段的侵蚀率。

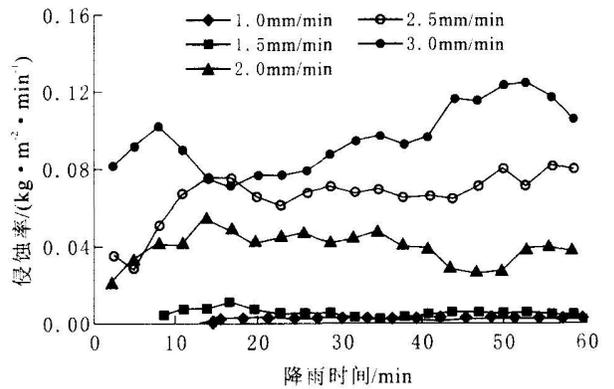


图4 道路侵蚀率随降雨过程的变化

经对1.0 mm/min雨强条件下的侵蚀率随降雨过程的变化进行拟合,可用下列对数函数相关方程进行描述:

$$E = 0.0129 \ln T + 0.025, \quad R = 0.8055 \quad (6)$$

式中:  $E$ ——侵蚀率( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ );  $T$ ——降雨时间(min)。

水蚀发生发展过程的动力是降雨及其产生的径流。恒雨强降雨条件下,坡面产流一般表现为开始产流后径流率由小到大再到基本稳定的变化过程。上述描述的侵蚀率变化过程,大体上基本响应了径流的变化过程,但由于侵蚀发生演变过程的复杂性及硬路面侵蚀的特殊性,必然使侵蚀率表现出其固有的变化特点。总的来讲,第一阶段由于径流搬运产流前雨滴击溅起的泥沙,同时侵蚀路面土体,因此,侵蚀率随径流迅速上升。进入第二阶段,由于侵蚀作用以当时的分离与随即的搬运为主,因此,侵蚀率基本稳定。第三阶段,由于侵蚀作用导致路面地形发生变化,相较于平整状态,趋向于粗糙崎岖,水流的汇集程度提高,侵蚀能力随之加大,很微观的重力侵蚀作用已经介入,因此,侵蚀率又进一步提高。

## 2.4 道路侵蚀随雨强和坡度的变化

土壤侵蚀是不同影响因子综合作用的结果。雨强和坡度是影响侵蚀的重要动力和地形因子。以往一些学者就雨强和坡度对侵蚀的影响都进行过研究<sup>[3, 6, 11-13]</sup>。为了阐明 2 个因子在黄土土质道路这样的硬地面条件下分别及综合的作用规律,对同一坡度不同雨强及同一雨强不同一坡度条件下的次降雨侵蚀特征进行了分析。

图 5 和图 6 分别是道路侵蚀随雨强及坡度的变化。统计分析表明,雨强及坡度对道路侵蚀的影响均可用幂函数相关方程描述:

$$Q = 0.0794I^{4.1517}, \quad R = 0.9842 \quad (7)$$

$$Q = 0.0477S^{1.4259}, \quad R = 0.9459 \quad (8)$$

式中:  $Q$ ——侵蚀模数 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ );  $I$ ——雨强 ( $\text{mm}/\text{min}$ );  $S$ ——坡度 ( $^\circ$ )。

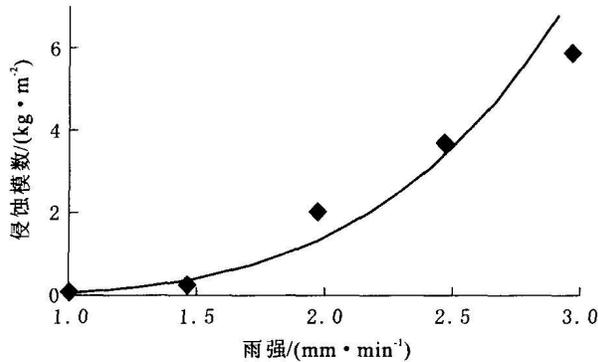


图 5 道路侵蚀模数随雨强的变化

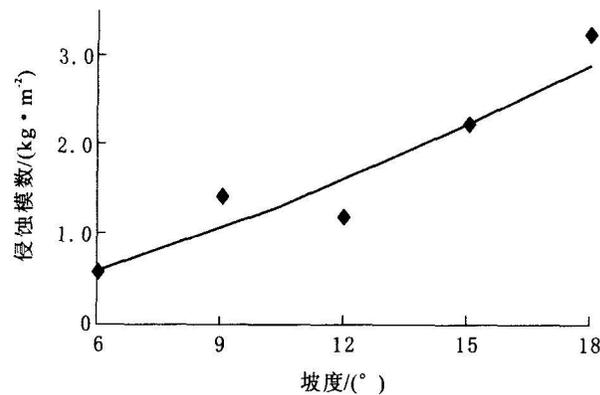


图 6 道路侵蚀模数随坡度的变化

道路侵蚀模数随雨强及坡度的增加虽然都表现为连续增大,但增加的特征有差异。降雨强度小于  $2 \text{ mm}/\text{min}$  条件下,侵蚀模数增加趋势比较缓和,降雨强度大于  $2 \text{ mm}/\text{min}$  后,侵蚀模数急剧增加,幅度很大,而侵蚀模数随坡度的变化,在试验坡度范围内,几乎以接近于直线的基本相同的幅度较缓地增加。

降雨动能在侵蚀过程中发挥极其重要的动力作用,雨强的增大不仅使降雨量增加,更使雨滴直径增大,雨滴速度加快,导致雨滴动能增大,而这种增大规律越大雨强越突出,雨滴动能的这种作用叠加在雨强的径流效应上,道路侵蚀模数随雨强的变化就必然表现出相应的特征规律。以往研究表明,土壤侵蚀随坡度的变化在  $25^\circ \sim 30^\circ$  间存在着一个临界坡度,那是由于坡度增大达到这样一个临界值时,坡度增大侵蚀的作用已不能抵消由于坡面斜面面积增大,雨滴数量变稀导致的弱化侵蚀作用的功效,因此侵蚀强度反而开始减小。由于本文的试验坡度范围还远低于临界坡度,所以坡度对侵蚀的影响基本遵守着坡度不很陡范围内相应的一般作用规律:即随着坡度的增大,土体越不稳定,越易于被侵蚀,伴随着坡度的增加,坡面径流流速相应增加,动能因此而变大,水流的侵蚀能力增强,这些作用加在一起,共同导致了随坡度的增大,土壤侵蚀也相应增加。

侵蚀是不同影响因子综合作用的结果,本文研究条件下则是雨强和坡度共同影响造成的。对不同强度及坡度条件下的试验结果进行多元回归分析,得出二因子的综合作用描述方程为:

$$Q = -7.0320 + 0.2178I + 3.1122S$$

$$R = 0.9716, F = 58.9368 > F_{2,7}^{0.01} = 9.55 \quad (9)$$

式中:  $Q$ ——侵蚀模数 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ );  $I$ ——雨强 ( $\text{mm}/\text{min}$ );  $S$ ——坡度 ( $^\circ$ )。

检验结果表明,雨强及坡度与道路侵蚀模数之间呈现的二元线性函数关系高度显著。

## 3 结论

(1) 道路侵蚀开始发生时间随雨强及坡度的变化皆可用幂函数相关方程表述。

(2) 各种雨强条件下,道路产流开始时含沙量很高,但都很快下降并随降雨历时的延长而逐渐趋于相对稳定的延续过程,  $1.0 \sim 2.0 \text{ mm}/\text{min}$  雨强条件下,  $25 \text{ min}$  以后基本稳定,  $2.5 \sim 30 \text{ mm}/\text{min}$  雨强条件下  $15 \text{ min}$  以后就基本稳定。

(3) 不同雨强条件下的道路侵蚀率变化过程总的可分为 3 个阶段:开始降雨后的  $20 \text{ min}$  前及  $40 \text{ min}$  后,侵蚀率随降雨过程的变化较大,  $20 \sim 40 \text{ min}$  之间侵蚀率随降雨过程变化基本稳定。  $20 \text{ min}$  以前各雨强条件下的侵蚀率变化表现为升降波动,波动结果是均达到第二阶段的侵蚀率。  $40 \text{ min}$  以后各雨强条件下的侵蚀率变化也表现为升降波动。

(下转第 9 页)

降低林带冠层后的风速,更显著地是降低了近地表的风速,平均较林带前降低了 38%和 32%,分别低于其起动风速 9.8m/s 和 9.2m/s;而防护林 A 林带后的近地表风速较林带前平均提高了 17%,反而大于其起动风速,这就是防护林 A 风蚀较防护林 B 和防护林 C 剧烈的原因。因此乔灌结合的防护林模式的防护效益确好于纯乔木的防护林,其中防护林 B 的防护效益要好于防护林 C。

### 3 结论

(1) 在风洞中采用 PIV 技术,不仅能观测起沙风速、风蚀量、风蚀强度等基础数据,而且可以清晰地模拟风沙流通过防护林带时风速变化的情况,有助于进一步研究防护林防沙的作用机理。风洞技术为土壤风蚀和荒漠化防治提供了新的科研途径。

(2) 陕北靖边县不同防护林配置模式的防护效益是明显的,可有效地减弱风蚀量,增大了起动风速,同时使穿过林带气流的能量大大降低,减轻了当地农田沙害。

(3) 通过实验资料分析,乔灌结合的防护林模式防沙效果较好的主要原因是灌木层可以有效地降低近地表面的风速。

(4) 从起动风速、风蚀强度和流场三方面来看,防护林 A、防护林 B 和防护林 C 这 3 种模式的防护效

益 A 最最差,B 和 C 明显要好于 A,但是 B 的防护效益是 3 种防护模式中最好的,即在 3 种防护林模式中防护林 B 是最合理和最佳的防护林配置模式。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 刘宝杰,王光华,等. PIV 在低速风洞中的应用[ J ]. 流体力学实验与测量, 1998, 6(2): 55—62.
- [ 2 ] 王元,吴廷奎,张希明,等. 塔南绿洲优化防护模式风洞实验研究初探[ J ]. 干旱区研究, 1995, 4(12): 76—80.
- [ 3 ] 姚仁太,张茂栓. 环境风洞流动的 PIV 测量[ J ]. 流体力学实验与测量, 1999, 13(3): 91—96.
- [ 4 ] 王忠林,高国雄,李会科,等. 毛乌素沙地农田防护林结构配置研究[ J ]. 水土保持研究, 1995, 2(2): 99—109.
- [ 5 ] 刘小平,董治宝. 湿沙的风蚀起动风速实验研究[ J ]. 水土保持通报, 2002, 22(2): 2—4.
- [ 6 ] 容姣凤,张海涛,毛宁. 土壤风蚀量随风速的变化规律研究[ J ]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(2): 149—153.
- [ 7 ] Lyles L, Krauses R K. Threshold velocities and initial particle motion as influenced by air turbulence[ J ]. Trans of the ASAE, 1971, 14(3): 563—566.
- [ 8 ] 王浩, Takle Eugene S. 防护林: 湍流的数学模型与计算机模拟[ J ]. 力学进展, 2003, 33(1): 119—135.
- [ 9 ] 董治宝,高尚玉. 直立植物—砾石覆盖组合措施的防风蚀作用[ J ]. 水土保持学报, 2000, 14(1): 8—11.
- [ 10 ] 金文,王元,张玮. 疏透型防护林绕林流场的 PIV 实验研究[ J ]. 流体力学实验与测量, 2003, 17(4): 56—61.

(上接第 4 页)

(4) 雨强及坡度对道路侵蚀的影响均可用幂函数相关方程描述。其中,降雨强度小于 2 mm/min 条件下,侵蚀模数随雨强增大而增加的趋势比较缓和,降雨强度大于 2 mm/min 后,侵蚀模数增幅很大。侵蚀模数随坡度的变化,在试验坡度范围内,以基本相同的幅度较缓地增加。

(5) 雨强及坡度对道路侵蚀模数的综合作用可用二元线性相关方程描述。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 朱显谟. 黄土高原土壤与农业[ M ]. 北京: 农业出版社, 1989. 96—121.
- [ 2 ] 孙建轩. 山区道路的水土流失及防治[ J ]. 水土保持通报, 1981, 1(4): 45—47.
- [ 3 ] 邱荣祖,方金武. 山地林道土壤侵蚀及其防蚀措施的研究[ J ]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(4): 50—54, 87.
- [ 4 ] 邱荣祖,王玉明,康文和. 山地林道路面土壤侵蚀的研究[ J ]. 森林工程, 1997, 13(4): 44—46.
- [ 5 ] 邱荣祖,韩忠有,许敏锋. 山地林道边坡土壤侵蚀及其防蚀措施的研究[ J ]. 森林工程, 1999, 15(2): 38—40.
- [ 6 ] 郑世清,周保林,赵克信. 长武王东沟试验区沟坡道路侵蚀及其防蚀措施[ J ]. 水土保持学报, 1994, 8(3): 29—35.
- [ 7 ] 郑世清. 沟坡道路侵蚀与防蚀技术体系[ M ]. 长武农业生态系统结构、功能及调控原理与技术. 北京: 气象出版社, 1998. 163—171.
- [ 8 ] 郑世清,周保林. 黄土高原沟壑区防蚀道路设计[ M ]. 黄土高原水土流失与治理模式. 北京: 中国水利水电出版社, 1998. 163—171.
- [ 9 ] 王玉宽,王占礼. 黄土高原坡面降雨产流过程的试验分析[ J ]. 水土保持学报, 1991, 5(2): 25—31.
- [ 10 ] 张光辉,梁一民. 黄土丘陵区人工草地径流起始时间研究[ J ]. 水土保持学报, 1995, 9(3): 78—83.
- [ 11 ] 刘小勇,吴普特. 硬地面侵蚀产沙模拟试验研究[ J ]. 水土保持学报, 2000, 14(1): 33—37.
- [ 12 ] 郑世清,周佩华. 土壤容重和降雨强度与土壤侵蚀和人参关系的定量分析[ J ]. 西北水土保持研究所集刊, 1988(7): 53—56.
- [ 13 ] 张科利. 黄土坡面侵蚀产沙分配及其与降雨特征关系的研究[ J ]. 泥沙研究, 1991(4): 39—46.