

黄土丘陵区土质裸露路面冲刷过程模拟试验研究^{*}

陈翠红¹, 郑世清², 田风霞³, 马春艳²

(1. 延安市宝塔区互项目办, 陕西 延安 716000; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100;

3. 兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000)

摘 要: 土质道路是当前黄土丘陵区农业生产与农村生活的主要道路, 也是发生水土流失最严重的土地利用类型。在野外调查研究定位监测的基础上, 采用室内人工降雨与人工放水冲刷组合模拟试验的方法进行实验模拟, 对该地区土质道路硬地面次降雨侵蚀产流、产沙、侵蚀过程及机理进行了初步研究, 为该地区土质道路侵蚀与防治提供了科学依据。

关键词: 黄土丘陵区; 土质路; 道路侵蚀过程; 防蚀机理

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)02-0045-04

Comparative Stimulation Research of the Erosion Process on Earth Coverd Roads in Loess Hilly Region

CHEN Cui-hong¹, ZHENG Shi-qing², TIAN Feng-xia³, MA Chun-yan²

(1. Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science, Yangling, Shaanxi Province 712100, China; 3. College of Resource & Environment of Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The earth road is the mostly road which bears the agro-productive activity and villagers' daily life in the loess hilly region. Based on field investigation, locative observation data, experimental methods of simulated rainfall and simulated pouring, the preliminary results about the runoff, roads erosive process, anticorrosion mechanism and impact factors during rainfall event on the hard surface roads in this region were reported, which offered scientific evidence for controlling road erosion in this region.

Key words: loess hilly region; earth covered roads; roads erosive process; anticorrosion mechanism

道路侵蚀是我国黄土高原地区普遍存在的一种极其严重的侵蚀类型。由于该区黄土具有深厚、疏松的特点, 因此, “千年道路变成河”就成为这里道路侵蚀程度最深刻的比喻。山坡土质道路是处于村庄、田间、工矿井位之间, 以实现田间生产、运输为主要目的而修建的交通线路。土质道路是当前黄土丘陵区农业生产与农村生活的主要道路, 也是发生水土流失最严重的土地利用类型。随着我国公路交通事业和新农村建设的不断发展, 山坡土质道路被大量修建, 以满足持续增长的各种农业生产经济建设活动、石油开发、水土流失治理工程等对山坡交通的要求。然而, 公路建设和运营对环境所产生的负面

影响越来越受到人们的关注, 农村土质道路建设和运营将面临着严峻的环境挑战。

随着黄土高原广泛开展的生态恢复重建工程进一步实施, 使得流域水土流失量来自面上的比重呈下降趋势, 而村镇聚落及路网硬地面系统产流产沙的贡献率呈上升局势^[1]。作为农村生产生活主要通道的土质道路, 其侵蚀状况已经和正在成为该地区生态危害最集中、单位面积危害最严重的生态问题^[2]。山区道路建设及资源开发对本地区侵蚀环境和侵蚀动力机制产生了巨大影响, 路网在流域自然排水系统上的叠加及道路线状特征使其成为汇流排水的重要途径, 直接影响着流域的行洪泄洪^[3], 在流

^{*} 收稿日期: 2009-05-15

基金项目: 国家科技支撑计划“西部村镇植被构建技术和水土流失防治技术的组装集成与示范”(2006BAJ10B06); 中国科学院知识创新工程重要项目(KZCX2-YW-421)

作者简介: 陈翠红(1966-), 女, 陕西省延安市人, 工程师, 主要从事水土保持综合治理与研究。E-mail: chengcuihong_2008@163.com

通信作者: 郑世清(1953-), 陕西延川人, 研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持综合治理研究。E-mail: zhengshiqing@126.com

域产流产沙预报模型中已成为不可缺少的重要组成部分。据美国北罗莱纳州林区观测,近 90 % 的河流泥沙来自道路^[4]。Ziegler A D 等在泰国北部通过试验发现,与农田相比,乡村道路在同样的降雨过程中开始产流时间更早并且进入沟渠的水流速度更快一些,并用 Smith 等开发的 KINEROS2 模型^[5]对道路的产流与产沙量进行了模拟^[6],与此同时,2000 年通过一年的观测试验,结果表明道路侵蚀速率以及由于道路侵蚀产生并进入河流的泥沙总量都比农田高很多^[7]。Pransutjarit 认为路长在增加径流和减少泥沙方面是一个最为重要的因子^[8]。Rijsdijk A & Bruijnzeel L A 描述了道路侵蚀在热带地区的危害性,并通过 Kanto 流域的观测指出,乡村道路虽然只占该区面积的 3 %,但其对该区泥沙的产生有很大影响^[9]。Dunne T & Dietrich W, Harden C P, Ziegler A D 分别在非洲、南美洲以及泰国也得到了类似的结果^[5,10-11]。

山坡道路侵蚀是一种有别于农地、林地、草地、荒坡地等土地利用方式的特殊侵蚀单元。当前延安黄土丘陵区的村庄、果园、农田等生产生活需求而大量修筑的山坡土质道路,由于忽视路面、边坡开挖面、边坡松散堆积物的防治,使其成为新的环境脆弱带,其水土流失程度明显高于非道路区,路面侵蚀更为如此^[12-13]。大量的山坡生产型土质道路路面土壤裸露,没有任何工程或生物措施保护,旱季通行时尘土飞扬,雨季泥泞或侵蚀沟纵横深切,通行能力极低且维护费用极高,形成了年年修路无路走的被动局面,并且对周围土地和环境造成不良生态危害,造成人力、物力、财力的严重浪费,对山区农业经济健康发展及生态环境建设造成严重的不良影响^[13-14]。

山坡生产型道路侵蚀严重的根源在于这种道路的裸露路面,经长期的人畜践踏和车辆碾压后,路面土壤结构破坏、地形下凹,不仅抗侵蚀能力降低,入渗能力减弱,而且还成为周围水沙汇集与输送的通道,产生的侵蚀及其危害相当严重。因此,开展黄土丘陵区土质道路冲刷过程及机理研究对强化线状道路防蚀治理等方面有着重要的意义。

1 材料与方法

1.1 试验装置

该项试验是在西北农林科技大学水土保持研究所模拟降雨大厅完成。采用侧喷式自动模拟降雨系统,降雨高度为 16 m,降雨强度范围为 20 ~ 200 mm/h。放水冲刷试验设备主要包括马氏瓶、供水

管道、水表、活动闸阀、稳流槽、集流装置及泥沙采集设备等。放水流量范围为 $(2.3 \sim 11.5) \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, 试验小区长 200 cm, 宽 55 cm, 深 35 cm, 装土深 30 cm, 装土体积为 0.33 m^3 。

1.2 试验材料

试验用土为取自陕西省延安市的黄绵土,试验前土壤经过自然风干后并通过 $0.5 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$ 筛子过筛,剔除土样中的植物根系等杂物,土壤水分达到 10 % 左右进行封存。

1.3 试验方法

1.3.1 土壤容重 设计土槽装土容重为 $1.35 \text{ g}/\text{cm}^3$,在试验过程按照公式(1)、(2)各层土体含水量,采用分层夯实填装,保证土壤容重达到试验设计的要求。

$$W_w = \frac{\gamma}{\gamma_s} \times 10^{-3} L w h (1 - \omega_1) / 100 \quad (1)$$

$$W_s = \frac{\gamma}{\gamma_s} \times 10^{-3} L w h (1 + \omega_1 / 100) - W_w \quad (2)$$

式中: W_w ——所需加水重量(kg); W_s ——所需装土重量(kg); γ ——土壤设计容重(g/cm^3); L ——小区长(cm); w ——小区宽(cm); h ——土层深(cm); ω_1 ——设计土壤重量含水量(%); ω_2 ——实测土壤重量含水量(%);

1.3.2 坡度、雨强、放水流量与历时 试验坡度分别为 $6^\circ, 9^\circ, 12^\circ, 15^\circ, 18^\circ$ 五个等级,雨强分别为 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 mm/min 五个等级,降雨历时为 60 min,放水 + 降雨为 30 min,防水流量分别为: $2.3 \times 10^{-5}, 4.6 \times 10^{-5}, 6.9 \times 10^{-5}, 9.2 \times 10^{-5}, 11.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$;

1.3.3 径流泥沙处理方法 将不同时段全部水样通过数小时静置后,除去上部清水后,置放在 105 烘箱中烘干称重并计算出不同时段侵蚀量。

1.3.4 流速的测定 采用染色剂(K_2MnO_4)法测定(在左/右 1/4 小区宽度的断面上,从上到下每 40 cm 一段,共分 5 段测),测定时间与产流产沙采集的时间同步,即产流开始时测定一次,产流后前 5 min 每隔 2 min、3 min,以后每隔 3 min 测定。

2 结果与分析

2.1 土质路产流过程研究

土质路放水降雨组合试验由同一坡度(15°)、同一雨强(2.0 mm/min)、不同放水流量($2.3 \times 10^{-5}, 4.6 \times 10^{-5}, 6.9 \times 10^{-5}, 9.2 \times 10^{-5}, 11.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$),每场试验重复一次。在试验前,首先要对降雨强度、放水流量进行率定,选择降雨分布均匀区布设试验土槽。

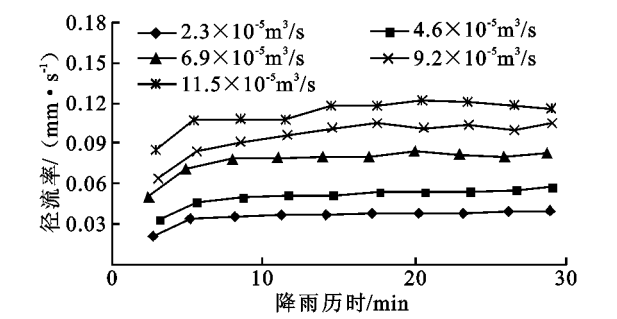


图 1 不同流量条件下径流率的变化

2.1.1 径流率随降雨过程的变化 从图 1 可以看出,径流率随着放水流量的加大、降雨历时的延长而增大。从次降雨过程来看,0~5 min 之间,径流率急剧增大,随后其变化趋势逐渐趋于平缓,基本上呈一水平直线,且不同放水流量条件下径流率随降雨历时的变化趋势基本一致。这是因为产流后,随着放水+降雨的进行,路面土壤含水量逐渐达到饱和,而在次降雨过程中降雨强度和放水流量却保持不变,所以产流率就基本上不再发生变化。

2.1.2 径流深与放水流量的关系 通过对同一坡度(15°)、同一雨强(2 mm/min)、不同放水流量条件下,土质路次降雨径流深与放水流量的关系进行统计分析,得出其之间的关系如表 2 所示

表 1 同一坡度、同一雨强条件下径流深与放水流量的关系

放水流量/ (10 ⁻⁵ m ³ · s ⁻¹)	2.3	4.6	6.9	9.2	11.5
径流深/mm	61.25	84.94	133.14	160.95	190.32

从表 2 可以看出,在降雨强度为 2 mm/min、坡度为 15°不同放水流量的条件下,次降雨所产生的径流深随着放水流量的增大而显著增加。通过对试验结果进行统计分析,次降雨所产生的径流深(H)与放水流量(Q)之间存在幂函数相关关系: $H = 31.552Q^{0.7283}$ ($R = 0.99$)。

2.2 土质路降雨侵蚀过程研究

2.2.1 道路侵蚀含沙量变化过程 在坡度为 15°、雨强为 2 mm/min、放水降雨组合条件下,含沙量随降雨过程的变化过程如图 2 所示,随着放水流量的逐步增大,发生明显变化。在放水流量为: 2.3×10^{-5} 、 4.6×10^{-5} m³/s 条件下,产流开始后 0~5 min 含沙量迅速增大后,含沙量随降雨历时的延长逐步减小,20 min 以后基本稳定。中间流量条件下降雨 10 min 后基本稳定。两个大流量条件下则总的继续上升,15~20 min 后反而下降。放水流量大的条件下,由于水流的动力作用很大,相应的侵蚀程度加重,坡面形态发生变化形成一定的侵蚀沟,所以含沙量总的走高,到后阶段随着侵蚀路面的形态变缓,侵

蚀程度又减弱,相应的含沙量则降低。

2.2.2 道路侵蚀率变化过程 在坡度为 15°、雨强为 2 mm/min 放水降雨组合条件下,不同放水流量与侵蚀率变化过程如图 3 所示,从图 2 与图 3 来看,不同放水流量条件下,道路侵蚀含沙量与道路侵蚀率变化过程有着明显的相似性。从开始产流到降雨 5 min,道路侵蚀率急剧增大,3 个小放水流量条件下,降雨 5 min 后侵蚀率随降雨过程的变化基本稳定,当放水流量为 11.5×10^{-5} m³/s 时,道路侵蚀率随降雨过程的变化经历两次先增大又减小的过程。

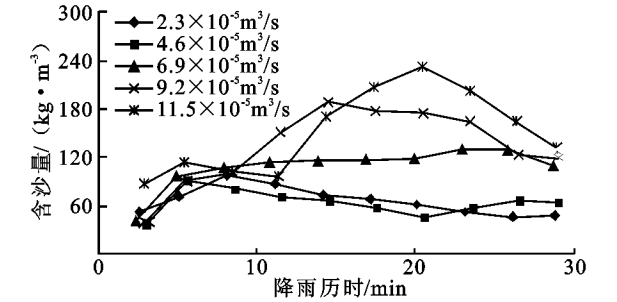


图 2 不同流量条件下含沙量变化

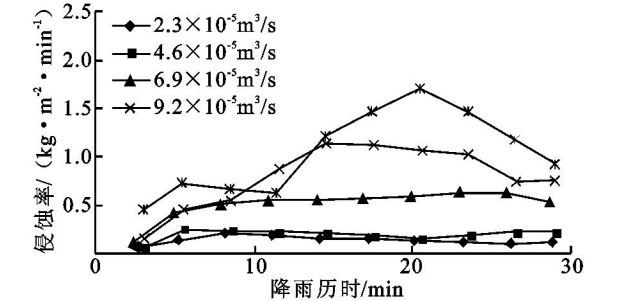


图 3 不同流量条件下侵蚀率变化

经对 3 个较大放水流量条件下的道路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:

$E_1 = 0.1696 \ln(T) + 0.085 \quad R = 0.90 \quad (3)$

$E_2 = 0.3391 \ln(T) - 0.0858 \quad R = 0.76 \quad (4)$

$E_3 = 0.4152 \ln(T) - 0.0229 \quad R = 0.72 \quad (5)$

式中: E_1 、 E_2 、 E_3 分别为 6.9×10^{-5} 、 9.2×10^{-5} 、 11.5×10^{-5} m³/s 放水流量条件下的道路侵蚀率 [kg/(m² · min)]; T ——降雨时间(min)。

2.2.3 道路侵蚀随放水流量的变化 图 4 是道路侵蚀随放水流量的变化。放水流量对道路侵蚀的影响可用幂函数相关方程描述。

$M = 1.1156Q^{1.3198} \quad R = 0.96 \quad (6)$

式中: M ——道路侵蚀模数(kg/m²); Q ——放水流量(10^{-5} m³/s)。

道路侵蚀模数随放水流量的增加而连续增大且两者之间高度相关,表明水力侵蚀的动力主要作用来自径流。

2.2.4 土质路放水降雨组合产流产沙关系研究

放水降雨组合(即放水+降雨)试验在这里主要模拟坡长对坡面径流及侵蚀的影响,是采取一种便易实现的方法研究坡长的坡面水文与侵蚀作用,目标是模拟降雨产流经不同坡长汇流后在不同坡位产生的水文、水力学及侵蚀响应。

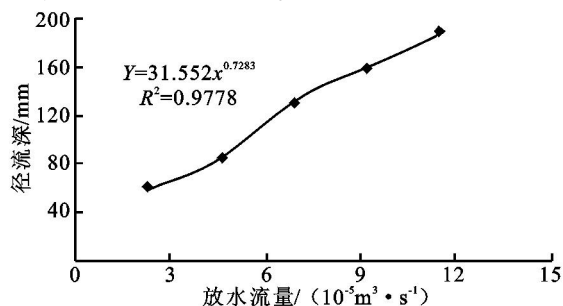


图 4 侵蚀模数与流量的关系

通过对同一坡度、同一雨强、不同放水流量条件下的 5 场土质路放水+降雨试验的产流产沙关系进行分析,得出道路侵蚀强度与径流深之间的关系如图 4。

从图 4 可以看出,在同一坡度、同一雨强、不同放水流量条件下,总体来说,随着径流深的增大侵蚀强度迅速增强。在两个较小放水流量条件下,虽然产流径流深之间有一定的差异但其引起的侵蚀强度却相差不大,当放水流量大于 $6.9 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 时,侵蚀强度随着径流深的增大而急剧增大。通过对试验数据进行统计分析,道路侵蚀强度与径流深之间呈幂函数关系且高度相关,关系式为:

$$Y = 0.0018 X^{1.8455} \quad R = 0.99 \quad (7)$$

式中: Y ——道路侵蚀强度 (kg/m^2); X ——次降雨径流深 (mm)。

3 结 论

采用人工模拟降雨及人工放水降雨组合试验的方法,对同坡度(15°)、不同雨强(1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 mm/min),同雨强(2.0 mm/min)、不同坡度(6°, 9°, 12°, 15°, 18°)以及同坡度(15°)、同雨强(2.0 mm/min)不同放水流量(2.3×10^{-5} , 4.6×10^{-5} , 6.9×10^{-5} , 9.2×10^{-5} , $11.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$)条件下土质路产流产沙关系进行了研究,主要结果如下:

(1) 径流率随着放水流量的加大、降雨历时的延长而增大。次降雨过程从开始产流到降雨 5 min 之间,径流率急剧增大,随后其变化趋势逐渐趋于平缓,基本上呈一水平直线,且不同放水流量条件下径流率随降雨历时的变化趋势基本一致。

(2) 土质路放水降雨组合产流产沙条件下,基于

不同放水流量条件的侵蚀强度随径流深的增大迅速增强,侵蚀强度与径流深之间高度相关,相关关系可用幂函数方程描述。

(3) 在不同放水流量条件下,在降雨冲刷过程中含沙量发生明显变化,在放水流量为 2.3×10^{-5} , $4.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 条件下,产流开始后 0~5 min 含沙量迅速增大后,含沙量随降雨历时的延长逐步减小,20 min 以后基本稳定。当放水流量增大到 9.2×10^{-5} , $11.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 时,由于水流的冲刷动力作用加大,相应的侵蚀程度加重,坡面形态发生变化并形成一定的侵蚀沟,所以含沙量总的走高,到后阶段随着路面侵蚀沟的形态变缓,侵蚀程度又减弱,相应的含沙量则降低。

(4) 在不同放水流量试验条件下,随着时间的变化,道路侵蚀的含沙量与侵蚀率变化过程有着明显的相似性, 2.3×10^{-5} , 4.6×10^{-5} , $6.9 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 三种小放水流量条件下,降雨 0~5 min 迅速增大后平稳。当放水流量达到 9.2×10^{-5} , $11.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 时,道路侵蚀率随降雨过程的变化经历两次先增大又减小的过程。经对三个较大放水流量条件下的道路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。

(5) 道路侵蚀模数与放水流量几乎呈直线关系,为幂函数相关关系。降雨径流是引起道路冲刷的直接动力,造成最为严重道路侵蚀主要取决于降雨强度于降雨历时,取决于路段上方集水区与道路路面汇集径流的大小,因此,道路侵蚀的防治首先必须有效控制坡面及路面汇集径流的形成,一是设法减少径流,二是设法提高路面抗冲性能。

(6) 在同一坡度、同一雨强、不同放水流量条件下,随着径流深的增大侵蚀强度迅速增强。在两个较小放水流量条件下,虽然产流径流深之间有一定的差异但其引起的侵蚀强度却相差不大,当放水流量大于 $6.9 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 时,侵蚀强度随着径流深的增大而急剧增大。通过对试验数据进行统计分析,道路侵蚀强度与径流深之间呈幂函数关系且高度相关。

参考文献:

- [1] 徐学选, 琚彤军, 郑世清, 等. 黄土丘陵区次降雨下的山坡道路侵蚀特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26 (增刊): 574-578.
- [2] 郑世清, 霍建林, 李英. 黄土高原山坡道路侵蚀与防治[J]. 水土保持通报, 2004, 24(1): 46-48.
- [3] 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.

(下转第 53 页)

抗蚀性加强,故递减到第一个峰谷;然后随着径流冲刷能力加强,使结皮遭到破坏,产沙量递增到第二个峰值;最后产沙量降低并趋于稳定。在 53 mm/h 雨强下,耕地和裸地土壤侵蚀过程可分为 2 个阶段,刚开始由于雨滴溅蚀达到峰值,然后土壤表层结皮不易被破坏,土壤侵蚀量逐渐下降并趋于稳定。

(2) 在 76 mm/h 雨强下,狗尾草径流量仅为 0.70 mm/h,土壤侵蚀量为 16.495 t/(hm²·h),保水保土效益最为突出,比裸地分别减少了 93.71% 和 97.78%,耕地水土流失最为严重,径流量为 20.11 mm/h,土壤侵蚀量为 1 202.6 t/(hm²·h),比裸地分别高出 81.00% 和 61.86%;而在 53 mm/h 下,狼尾草、狗尾草和三叶草水土保持作用都很突出,保土效益都高达 90% 以上,裸地水土流失最为严重。

参考文献:

[1] 王礼先. 水土保持学[M]. 北京:中国林业出版社, 1995.
[2] 水利部水土保持监测中心. 水土保持监测技术[S]. 2003.
[3] 温光远,刘世荣. 我国主要森林生态系统类型降雨截流规律的数量分析[J]. 林业科学,1995,31(4):289-298.

[4] 刘向东,吴钦孝,赵鸿雁. 森林植被垂直截留作用与水土保持[J]. 水土保持研究,1994,1(3):8-13.
[5] 韦红波,李锐,杨勤科. 我国植被水土保持功能研究进展[J]. 植物生态学报,2002,26(4):489-496.
[6] 王万忠,焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量研究[J]. 水土保持通报,1996,16(5):1-20.
[7] 于冬升,史学正,王宁. 用人工模拟降雨研究亚热带坡耕地土壤的沟蚀和沟间侵蚀[J]. 土壤学报,2001,38(2):160-166.
[8] 陈奇伯,王克勤,李金洪,等. 元谋干热河谷坡耕地土壤侵蚀造成的土地退化[J]. 山地学报,2004,22(5):528-532.
[9] 何炳辉,缪驰远,吴咏,等. 遂宁组紫色土坡耕地土壤侵蚀规律研究[J]. 水土保持学报,2004,18(3):9-12.
[10] 高军侠,党宏斌,刘作新,等. 黄土高原南部裸露坡耕地产流产沙试验研究[J]. 生态学杂志,2004,23(3):138-140.
[11] 汪有科,吴钦孝,韩冰,等. 森林植被水土保持功能评价[J]. 水土保持研究,1994,1(3):24-30.
[12] 鲍文,包维楷,何炳辉,等. 森林生态系统对降水的分配与拦截作用[J]. 山地学报,2004,22(4):483-491.
[13] 刘向东,吴钦孝,施立明,等. 对六盘山森林截留降水作用的研究[J]. 林业科技通讯,1982(3):18-21.

(上接第 48 页)

[4] Hoover M D. Water and timbermanagement[J]. Journal Soil and water Conservation, 1952,7(4):75-78.
[5] Smith R E, Goodrich D C, Quinton J N. Dynamic distributed simulation of watershed erosion: the KINEROS2 and EUROSEM models [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 50(5):517-520.
[6] Ziegler A D, Thomas W G. Hydrologic change and accelerated erosion in northern Thai-land[EB/OL]. <http://www2.hawaii.edu/seassa/explorations/v1n1/art3/v1n1-art3.html>, 2006-3-9.
[7] Ziegler A D, Thomas W G, Ross A. Sutherland Estimation of basin sediment flux in the Pang Khum Experimental Watershed in Northern Thailand: the contributions of roads and agricultural lands [R]. Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, 2000.
[8] Chamnonk, Pransutjarit. Impacts of Land Use Evolution on Stream-flow and Suspended Sediment in Mae Taeng Watershed [D]. Hengmai: Kasetsart University, 1983.
[9] Rijdsdijk A, Bruijnzeel L A. Erosion Sediment Yield

and Land-Use Patterns in the Upper Konto Watershed, East Java, Indonesia, Part III: Results of the 1989 - 1990 Measuring Campaign [Z]. Project Communication No. 18, Konto River Project, Kingdom of the Netherlands, Ministry of Foreign Affairs, Director General of International Cooperation, 1991.
[10] Dunne T, Dietrich W. Sediment Sources in Tropical Drainage Basins in Soil Erosion and Conservation in the Tropics [J]. ASAE Special Publication, 1982, 43:368-385.
[11] Harden C P. Incorporation Roads and Footpaths in Watershed-scale Hydrologic and Soil Erosion Models [J]. Physical Geography, 1992,13:378-392.
[12] 郑世清,郑科. 延安黄土区植物路植物根系与水保功能评价研究[J]. 水土保持学报,2003,17(2):174-176.
[13] 曹世雄,陈莉,高旺盛. 山区农田道路路面种草生长发育与通行能力观测[J]. 农业工程学报,2006,22(1):69-72.
[14] 田风霞,王占礼,郑世清,等. 黄土道路侵蚀过程模拟试验研究[J]. 水土保持通报,2007,27(2):1-4,9.