

银武高速公路同心至固原段边坡面蚀试验分析

李猛¹, 张洪江^{1*}, 王晓东¹, 江玉林², 陈宗伟², 张红丽¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 交通部科学研究院, 北京 100029)

摘要: 为研究高速公路边坡面蚀, 选择银武高速公路同心至固原段固原立交 2.5 km 范围作为研究区段, 根据不同公路边坡类型和防治措施设置 6 个观测小区, 采用插钎法测定坡面的面蚀量, 同时由虹吸式自记雨量计记录降雨量。分别测定和计算了降雨量、降雨历时、平均降雨强度、前期降雨量 4 个因子。分析结果表明, 降雨对坡面面蚀的制约关系十分明显。影响面蚀量的主要降雨因子是降雨量和平均降雨强度, 面蚀量与降雨量和平均降雨强度呈现极显著和显著的正相关关系, 面蚀量与降雨因子中的前期降雨量呈现一定的负相关关系。采用强迫引入法, 建立了面蚀量与降雨因子主成分的回归方程。

关键词: 高速公路; 边坡; 面蚀; 统计分析

中图分类号: S157, U416.1+4

文献标识码: A

近年来我国公路, 尤其是高速公路发展迅速。高速公路建设给当地带来经济繁荣的同时, 也带来一些生态环境问题, 而其中影响较大的就是水土流失问题。尤其在经济相对落后的西部地区, 高速公路建设造成的水土流失更为严重。针对公路边坡土壤侵蚀的研究, 我国是从近几年才开始的。目前大多学者是从路基边坡稳定问题出发, 研究公路边坡侵蚀对其稳定性的影响, 为采取相应的防护措施提供理论依据。还有一些学者通过人工降雨试验寻求公路边坡侵蚀的规律, 着重研究了公路边坡侵蚀的影响因素, 提出公路边坡侵蚀的预测模型^[1~6], 但是对自然降雨条件下公路边坡侵蚀研究较少。本文选择即将竣工的银(川)武(汉)高速公路同心至固原段作为观测研究区段, 在自然降雨条件下开展公路边坡面蚀试验并对结果进行统计分析, 为高速公路的水土流失防治提供科学依据。

1 研究区概况

研究区段位于银武高速公路同心至固原段固原立交 2.5 km 范围内。银武高速公路同心至固原段地处黄土高原中部, 地势南高北低, 南为六盘山山地, 东北为黄土丘陵, 中部为清水河河谷平原, 路线主要沿清水河河谷冲积平原由北向南布设。气候为中温带半干旱大陆性气候, 地势较高, 冬季为西北高寒气流东下通道, 夏季处于东南湿润气流北行之末梢。冬寒长、夏热短、秋凉早、春暖快, 年平均气温在 7℃左右, 极端最低气温 -28.1℃, 极端最高气温 34.6℃。干旱少雨, 年平均降水量只有 478 mm。日照充足, 蒸发强烈, 年平均日照时数为 2 518 h。风大沙多、雨雪稀少, 年平均风速 2.7 m/s, 最大风速 28 m/s。风向多为西北风, 大风多发生在 3~5 月, 夹有沙尘, 有时形成沙尘暴。一般地区积雪厚度 10 cm 左右, 局部低凹沟壑地带由于风力作用达 0.7~1.7 m 左右, 最大冻土深 1.18 m。

收稿日期 (Received date): 2006-12-20; 改回日期 (Accepted): 2007-04-11。

基金项目 (Foundation item): 交通部西部交通科技项目“公路路域生态工程技术研究 (20033182233)”的部分研究内容。[Supported by West Transportation Science and Technology Project of Ministry of communications (20033182233)]

作者简介 (Biography): 李猛 (1982-), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 水土保持。Tel 010-62338845; E-mail 19821217@163.com。[Li Meng (1982-), male, born in Nanyang Henan, master mainly research in soil and water conservation]

* 通讯作者 (Correspondent author): 张洪江, 教授, 主要研究方向: 土壤侵蚀与流域管理。[Zhang Hongjiang professor, mainly research in soil erosion and watershed management]

2 研究内容和方法

2.1 试验设计

为研究高速公路边坡面蚀,依据不同公路边坡类型和地表状况,布设 6 个试验小区,Ⅰ区、Ⅱ区为

弃土场观测小区;Ⅲ区、Ⅵ区为填方边坡拱形框架梁防护小区,其中Ⅱ区布设 9 个观测点,Ⅵ区布设 2 个观测点;Ⅳ区、Ⅴ区为填方边坡六棱砖防护小区,在每个观测小区内设置 12 个观测点。试验小区地表状况见表 1。

表 1 试验小区地表状况
Table 1 Conditions of land surface in the experimental field

| 观测内容 | I | II | III | IV | V | VI |
|--------------------------|--------------|--------------|---------|---------|---------|---------|
| 边坡类型 | 弃土场 | 弃土场 | 填方路基 | 填方路基 | 填方路基 | 填方路基 |
| 工程措施 | 无 | 无 | 拱形框架梁 | 六棱砖防护 | 六棱砖防护 | 拱形框架梁 |
| 坡度(°) | 35 | 35 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| 坡向 | 西 | 东 | 东偏北 20° | 北偏东 20° | 南偏西 20° | 西偏南 20° |
| 土壤容重(g/cm ³) | 1.34 | 1.45 | 1.48 | 1.45 | 1.33 | 1.57 |
| 植被盖度(%) | — | — | 0~60 | — | 30 | — |
| 结皮情况 | 有结皮,厚度约 2 mm | 有结皮,厚度约 4 mm | 基本无结皮 | 基本无结皮 | 轻微结皮 | 基本无结皮 |
| 砾石含量(%) | < 2 | < 2 | 5~30 | 20 | 5~10 | 15~30 |

2.2 研究方法

坡面面蚀量的观测采用插钎法^[7],每次降雨后 24 h 内对小区多点土壤面蚀厚度进行观测,并记录相邻两次降雨的钢钎刻度差值,然后求其平均值作为该坡面相应场次降雨产生的面蚀厚度。

在研究区内安置一个虹吸式自记雨量计,记录降雨量、降雨强度和降雨历时。根据研究区降雨的季节性规律,试验从 6 月 20 日基本进入雨季时开始,到 8 月 30 日雨季结束时为止,期间共观测到 13 场降雨,观测期内降雨因子值见表 2。

表 2 观测期内降雨因子值

Table 2 Values of factor of rainfall during the observed periods

| 日期 | 降雨量 (mm) | 降雨历时 (h) | 平均降雨强度 (mm/h) | 前期降雨量 (mm) |
|--------|-------------|-------------|------------------|---------------|
| 6月 22日 | 1.0 | 4.17 | 0.24 | 0.00 |
| 6月 28日 | 6.5 | 1.50 | 4.33 | 0.00 |
| 7月 02日 | 30.0 | 1.00 | 30.00 | 0.51 |
| 7月 04日 | 2.0 | 0.75 | 2.67 | 10.80 |
| 7月 08日 | 1.3 | 2.25 | 0.58 | 0.26 |
| 7月 10日 | 4.2 | 6.00 | 0.70 | 0.47 |
| 7月 21日 | 31.9 | 19.00 | 1.68 | 0.00 |
| 7月 24日 | 2.8 | 0.83 | 3.37 | 6.89 |
| 7月 31日 | 12.6 | 6.00 | 2.10 | 0.00 |
| 8月 5日 | 15.4 | 1.37 | 11.24 | 0.00 |
| 8月 14日 | 52.1 | 5.50 | 9.47 | 0.00 |
| 8月 19日 | 15.4 | 1.33 | 11.58 | 4.05 |
| 8月 20日 | 10.2 | 19.17 | 0.53 | 9.24 |

试验选取的降雨因子包括:降雨量、降雨历时、平均降雨强度和前期降雨量,表 2 中前期降雨量由式(1)计算得到

$$p_{a0} = \sum_{i=1}^n R_{i24} K^i \tag{1}$$

式中 p_{a0} 为面蚀前一天的前期降雨量; R_{i24} 为面蚀前 1、2、3…… i 天日降雨量; i 为天数, K 为递减系数。

3 结果与分析

3.1 坡面面蚀

降雨雨滴落到地面,击溅作用使土壤结构破坏和土壤颗粒产生位移,为土壤面蚀发生奠定了基础。当降雨继续至形成地表径流时,地表径流就成为冲刷和搬运地表土壤颗粒的动力,开始形成的地表径流处于未集中的分散状态,分散的地表径流逐渐冲走地表土粒,形成面蚀^[11]。观测期内 6 个试验小区面蚀量见表 3。

3.2 降雨因子与面蚀量的相关分析

将表 2 和表 3 中降雨因子和坡面面蚀的原始值分别标准化^[8-10],得到各因子的标准化值。标准化的目的是消除各因子间由于量纲不同而对分析造成的影响。本文采用的标准化方法是:把每一组内的各原始数据减去其平均值,再除去其标准差,即

$$X = \frac{x_{ij} - \bar{x_j}}{S_j} \tag{2}$$

式中 X 为标准化值; x_{ij} 为原始数据; $\bar{x_j}$ 为第 i 列的平均数; S_j 为第 j 列的标准差。标准化结果见表 4。

对各降雨因子和小区面蚀量的标准化数据, 利用 SPSS 软件进行皮尔逊 (Pearson) 相关分析^[12], 结果见表 5。

表 3 观测期内小区面蚀量 (t/km²)

Table 3 Amount of surface erosion during the observed periods(t/km²)

| 日期 | I | II | III | IV | V | VI |
|--------|----------|----------|---------|----------|---------|---------|
| 6月 22日 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 6月 28日 | 446.7 | 483.3 | 246.7 | 120.8 | 110.8 | 366.3 |
| 7月 02日 | 2 233.3 | 2 175.0 | 1 233.3 | 2 416.7 | 1 108.3 | 1 465.0 |
| 7月 04日 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 7月 08日 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 7月 10日 | 335.0 | 362.5 | 123.3 | 120.8 | 0.0 | 122.1 |
| 7月 21日 | 1 228.3 | 1 208.3 | 986.7 | 1 450.0 | 665.0 | 976.7 |
| 7月 24日 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 7月 31日 | 893.3 | 967.3 | 493.3 | 604.2 | 221.7 | 488.3 |
| 8月 5日 | 1 005.0 | 1 570.8 | 740.0 | 966.7 | 443.3 | 732.5 |
| 8月 14日 | 2 680.0 | 3 265.5 | 1 480.0 | 2 658.3 | 1 330.0 | 1 831.3 |
| 8月 19日 | 1 567.8 | 966.7 | 740.0 | 1 691.7 | 886.7 | 1 098.8 |
| 8月 20日 | 558.4 | 483.3 | 246.7 | 362.5 | 110.8 | 244.2 |
| 合计 | 10 947.8 | 11 482.7 | 6 290.0 | 10 391.7 | 4 876.6 | 7 325.3 |

表 4 降雨因子和小区面蚀量标准化值

Table 4 Standardized values of factors of rainfall and the amount of surface erosion

| 日期 | 降雨因子 | | | | 小区面蚀量 | | | | | |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 降雨量 | 降雨历时 | 平均雨强 | 前期降雨量 | I | II | III | IV | VII | V |
| 6月 22日 | - 0.868 4 | - 0.175 7 | - 0.700 5 | - 0.629 4 | - 0.552 5 | - 0.549 2 | - 0.552 2 | - 0.547 0 | - 0.541 9 | - 0.550 5 |
| 6月 28日 | - 0.508 2 | - 0.591 0 | - 0.206 5 | - 0.629 4 | - 0.394 7 | - 0.387 4 | - 0.400 6 | - 0.502 5 | - 0.455 7 | - 0.357 8 |
| 7月 02日 | 1.030 8 | - 0.668 7 | 2.893 7 | - 0.500 0 | 0.236 4 | 0.179 0 | 0.205 7 | 0.343 5 | 0.320 2 | 0.220 2 |
| 7月 04日 | - 0.802 9 | - 0.707 6 | - 0.407 0 | 2.111 7 | - 0.552 5 | - 0.549 2 | - 0.552 2 | - 0.547 0 | - 0.541 9 | - 0.550 5 |
| 7月 08日 | - 0.848 7 | - 0.474 3 | - 0.659 4 | - 0.563 5 | - 0.552 5 | - 0.549 2 | - 0.552 2 | - 0.547 0 | - 0.541 9 | - 0.550 5 |
| 7月 10日 | - 0.658 8 | 0.108 9 | - 0.644 9 | - 0.510 2 | - 0.434 1 | - 0.427 9 | - 0.476 4 | - 0.502 5 | - 0.541 9 | - 0.486 3 |
| 7月 21日 | 1.155 2 | 2.130 6 | - 0.526 6 | - 0.629 4 | - 0.118 6 | - 0.144 7 | 0.054 2 | - 0.012 7 | - 0.024 6 | - 0.036 7 |
| 7月 24日 | - 0.750 5 | - 0.695 2 | - 0.322 5 | 1.119 3 | - 0.552 5 | - 0.549 2 | - 0.552 2 | - 0.547 0 | - 0.541 9 | - 0.550 5 |
| 7月 31日 | - 0.108 7 | 0.108 9 | - 0.475 8 | - 0.629 4 | - 0.236 9 | - 0.225 4 | - 0.249 1 | - 0.324 4 | - 0.369 5 | - 0.293 6 |
| 8月 5日 | 0.074 7 | - 0.611 2 | 0.628 0 | - 0.629 4 | - 0.197 5 | - 0.023 3 | - 0.097 5 | - 0.190 8 | - 0.197 1 | - 0.165 2 |
| 8月 14日 | 2.478 1 | 0.031 1 | 0.414 3 | - 0.629 4 | 0.394 2 | 0.544 1 | 0.357 3 | 0.432 5 | 0.492 7 | 0.412 9 |
| 8月 19日 | 0.074 7 | - 0.617 4 | 0.669 1 | 0.398 5 | 0.001 4 | - 0.225 6 | - 0.097 5 | 0.076 3 | 0.147 8 | 0.027 5 |
| 8月 20日 | - 0.265 9 | 2.157 1 | - 0.665 5 | 1.715 7 | - 0.355 2 | - 0.387 4 | - 0.400 6 | - 0.413 4 | - 0.455 7 | - 0.422 0 |

表 5 降雨因子与小区面蚀量的相关分析

Table 5 Correlation analysis of factors of rainfall and the amount of surface erosion

| 小区号 | 降雨量 | | 降雨历时 | | 平均降雨强度 | | 前期降雨量 | |
|-----|--------------------|-----------|--------|-----------|--------------------|-----------|--------|-----------|
| | 相关系数 R | 双侧显著性检验 P | 相关系数 R | 双侧显著性检验 P | 相关系数 R | 双侧显著性检验 P | 相关系数 R | 双侧显著性检验 P |
| I | 0.931 [*] | 0 | 0.066 | 0.830 | 0.709 [*] | 0.007 | -0.343 | 0.251 |
| II | 0.947 [*] | 0 | 0.048 | 0.876 | 0.637 [*] | 0.019 | -0.403 | 0.172 |
| III | 0.958 [*] | 0 | 0.142 | 0.643 | 0.670 [*] | 0.012 | -0.399 | 0.177 |
| IV | 0.926 [*] | 0 | 0.062 | 0.840 | 0.734 [*] | 0.004 | -0.315 | 0.295 |
| V | 0.918 [*] | 0 | 0.017 | 0.955 | 0.721 [*] | 0.005 | -0.343 | 0.303 |
| VI | 0.941 [*] | 0 | 0.056 | 0.856 | 0.697 [*] | 0.008 | -0.376 | 0.218 |

注: * * 相关系数具有极显著性意义; * 相关系数具有显著性意义。

由表 5 中看出, 各观测小区面蚀量与降雨量均呈现出极显著的正相关关系, 与平均降雨强度呈现出显著的相关关系。说明影响小区面蚀量的主要降雨因子是降雨量和平均降雨强度。同时面蚀量与降雨量的相关系数均大于面蚀量与平均降雨强度的相关系数, 这说明降雨量对面蚀量的影响程度超过平均降雨强度。

各观测小区面蚀量与降雨历时和前期降雨量的相关性不显著, 但面蚀量与前期降雨量呈一定的负相关关系, 这是因为当降雨发生时, 一部分降雨未形成坡面产流就发生入渗, 但由于试验小区坡面土壤砾石含量较大, 导致土壤孔隙度也较大, 这大大提高了降雨的入渗速率, 到下一场降雨来临前坡面表层土壤的含水量并没有受到很大的影响; 另一部分降雨形成了坡面产流, 产流的冲刷力带走了表层中抗蚀性较差的土壤颗粒, 导致坡面土壤表层砾石含量增大, 抗蚀性加强, 减少了下一场降雨的面蚀量, 所以前期降雨量越大, 坡面面蚀量反而减少, 二者呈现一定的负相关关系^[13]。

3.3 降雨因子与面蚀量的多元回归分析

所分析的 4 个降雨因子彼此并不是完全独立的, 而是存在一定的相关关系。为了消减这些因子中相互重叠的信息, 对 4 个降雨因子进行主成分分析, 然后再与小区面蚀量进行回归分析来探讨二者之间的关系。

主成分分析是根据原因子间的相关性, 通过降维方法把原来多个因子简化为几个综合指标。即是说每一个综合指标就是一个主成分, 每一个主成分用原来因子的线性组合来表示, 使这些主成分尽可能地反映原因子的信息量, 又使各个主成分彼此

不相关, 达到削减指标间信息重叠的目的^[10]。对 4 个降雨因子的标准化值进行主成分分析, 结果见式 (3) 和式 (4):

第一主成分

$$X(1) = 0.758D(1) - 0.219D(2) + 0.820D(3) - 0.618D(4)$$

(3)

第二主成分

$$X(2) = 0.503D(1) - 0.943D(2) + 0.298D(3) - 0.090D(4)$$

(4)

式中 $D(1)$ 为降雨量因子, $D(2)$ 为降雨历时因子, $D(3)$ 为平均降雨强度因子, $D(4)$ 为前期降雨量因子。

第一主成分 $X(1)$ 和第二主成分 $X(2)$ 的累计贡献率达到 73.93%, 可以说明它们包含了降雨因子中的大部分信息, 基本上反映了降雨的相关特征。因此取其作为降雨因子的综合指标对小区面蚀量 (标准化值) 做多元回归分析, 回归分析采用强迫引入法 (Enter)^[10-14, 15], 以小区面蚀量作为因变量, 2 个主成分作为自变量, 运用 SPSS 软件进行多元线性回归, 回归方程的一般形式为

$$Y = AX(1) + BX(2) + C$$

(5)

式中 Y 为小区面蚀量; A 为主成分 $X(1)$ 的回归系数; B 为 $X(2)$ 的回归系数; C 为常数项。

对各小区分别进行回归分析, 结果见表 6

从表 6 中看出, 6 个小区的面蚀量与降雨因子主成分的线性回归方程的复相关系数均大于 0.9 达到极显著水平。这表明所建立的回归方程是有效的, 同时也说明这 2 个降雨综合指标直接影响着小区的面蚀量。主成分的回归系数均大于主成分的回归系数, 表明主成分所包含的降雨综合指标在影响

表 6 降雨因子主成分与小区面蚀量的回归分析结果

Table 6 Results of regression analysis of principal component of rainfall factors and the amount of surface erosion

| 小区号 | 回归方程 | 复相关系数 R | 统计量 F | 显著性检验 P |
|-----|-------------------------------|---------|--------|---------|
| I | $Y=0.159X(1)+0.071X(2)-0.255$ | 0.923 | 28.735 | 0.000 |
| II | $Y=0.168X(1)+0.079X(2)-0.254$ | 0.925 | 29.563 | 0.000 |
| III | $Y=0.161X(1)+0.093X(2)-0.255$ | 0.956 | 52.733 | 0.000 |
| IV | $Y=0.180X(1)+0.077X(2)-0.252$ | 0.919 | 27.153 | 0.000 |
| V | $Y=0.186X(1)+0.070X(2)-0.250$ | 0.904 | 22.386 | 0.000 |
| VI | $Y=0.166X(1)+0.074X(2)-0.254$ | 0.932 | 32.830 | 0.000 |

坡面面蚀的作用中占主要地位。

3.4 结果评价

对于得到的回归方程是否实用, 通常还可用统计学方法来检验分析所建立方程的有效性^[10]

$$EF=1-\frac{\sum_{i=1}^N(P_i-Q_i)^2}{\sum_{i=1}^N(Q-Q_i)^2}$$

(6)

式中 P_i 为面蚀量预测值; Q_i 为试验测定面蚀量; \overline{Q} 为试验测定面蚀量的平均值。

在统计学中认为当 EF 值为 1 时, 拟和程度最好, EF 值越接近 1 就越接近实际状态。由小区面蚀量的 EF 计算值(表 7)可以看出, 所建立的面蚀量与降雨因子主成分回归方程能够很好地预测高速公路边坡面蚀量。

表 7 小区面蚀量的 EF 值

Table 7 EF values of the amount of surface erosion

| 小区号 | I | II | III | IV | V | VI |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| EF 值 | 0.848 5 | 0.852 1 | 0.910 6 | 0.841 1 | 0.813 8 | 0.864 5 |

4 结论

影响高速公路边坡面蚀量的主要降雨因子是降雨量和平均降雨强度, 面蚀量与降雨量呈现出极显著的正相关关系, 与平均降雨强度呈现出显著的相关关系, 同时降雨量对面蚀量的影响程度超过平均降雨强度。面蚀量与降雨因子中的前期降雨量的相关性不显著, 但呈现一定的负相关关系。

通过主成分分析, 将降雨量、降雨历时、平均降雨强度和前期降雨量 4 个因子简化为 2 个主成分, 由面蚀量与 2 个主成分建立的回归方程复相关系数均大于 0.9, 两者呈较好的线性相关关系, 这表明研究区降雨指标在很大程度上制约着坡面面蚀量。

参考文献 (References)

[1] Li Zhigang, Chen Yunhe, Qian Guochao Field erosion simulation test study for expressway slopes[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2004, 21(1): 30~32[李志刚, 陈云鹤, 钱国超. 高速公路边坡野外模拟冲刷试验研究[J]. 公路交通科技, 2004, 21(1): 30~32]

[2] Li Zhigang, Zeng Xuejun, Chen Yunhe Research on critical gradient for erosion of expressway embank slope based on energy method[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2003, 33(3): 340~342[李志刚, 邓学钧, 陈云鹤. 基于能量法的高等级公路路堤边坡冲刷临界坡度研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2003, 33(3): 340~342]

[3] Li Zhigang, Wu Wei, Chen Yunhe Primary research on critical height of erosive protection for embankment of freeways[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2003, 20(2): 24~27[李志刚, 吴伟, 陈云鹤. 高速公路路堤边坡冲刷防护临界高度初探[J]. 公路交通科技, 2003, 20(2): 24~27]

[4] Luo Bin, Hu Houtian, Wang Binggang Study on scouring intensity of subgrade slope[J]. *China Railway Science*, 2002, 23(3): 82~84[罗斌, 胡厚田, 王秉纲. 路基边坡坡面冲刷强度探讨[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(3): 82~84]

[5] Luo Bin, Wang Binggang, Wang Xuancang Basic theory of side slope surface scouring[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2002, 19(4): 27~29[罗斌, 王秉纲, 王选仓. 路基边坡坡面冲刷基本理论[J]. 公路交通科技, 2002, 19(4): 27~29]

[6] Wang Fei, Li Rui, Yang Qinke A study on soil erosion and soil and water conservation of highway construction[J]. *Highway*, 2003, (8): 148~152[王飞, 李锐, 杨勤科. 公路建设水土流失与水土保持研究[J]. 公路, 2003, (8): 148~152]

[7] Li Wenyin, Wang Zhiguo, Cai Jiqing et al Soil and water conservation in industrial mining area[M]. Beijing: Science Press, 1996: 122~125[李文银, 王治国, 蔡继清, 等. 工矿区水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 122~125]

[8] Chen Zongwei Study on Soil Erosion Law and Soil and Water Conservation Measures of Constructing Expressway From Yichang to Changyang[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006: 70[陈宗伟. 在建高速公路土壤侵蚀规律及其水土保持措施体系研究——以湖北护蓉西高速公路宜长段为例[D]. 北京: 北京林业大学,

- 2006: 70]
- [9] He Fan, Zhang Hongjiang, Shi Yuhu, *et al*. Influence of rainfall factors on preferential flow in the granite region of the Three Gorges of the Yangtze River[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(3): 75~ 78[何凡, 张洪江, 史玉虎, 等. 长江三峡花岗岩地区降雨因子对优先流的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 75~ 78]
- [10] Zhang Hongjiang, Cheng Jinhua, He Fan, *et al*. Preferential Flow Movement and Modeling in the Granite Region of the Three Gorges of Yangtze River[M]. Beijing: Science Press, 2006. 218~ 267[张洪江, 程金花, 何凡, 等. 长江三峡花岗岩地区优先流运动及其模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 218~ 267]
- [11] Zhang Hongjiang. Principles of Soil Erosion[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2000. 45~ 54[张洪江. 土壤侵蚀原理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000. 45~ 54]
- [12] Lang Nanjun, Zhen Ke Wen, Shaolong, *et al*. Canonical correlation analysis of factors causing soil erosion in the Jinshajiang River valley[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(3): 39~ 44[郎南军, 郑科, 温绍龙, 等. 金沙江流域高原山地土壤侵蚀影响因子的相关分析[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(3): 39~ 44]
- [13] Yuan Jianping, Jiang Dingsheng, Gan Shu. Factors affecting rainfall-runoff duration on sloping land[J]. *Journal of Mountain Research*, 1999, 17(3): 259~ 264[袁建平, 蒋定生, 甘淑. 影响坡地降雨产流历时的因子分析[J]. 山地学报, 1999, 17(3): 259~ 264]
- [14] Zhang Hengxi, Guo Jilian, Zhu Jiayuan, *et al*. Analyzing Method of Multivariate Data of Small Sampling and Its Application[M]. Xi'an: Northw estern Polytechnical University Press, 2002. [张恒喜, 郭基联, 朱家元, 等. 小样本多元数据分析方法及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2002.]
- [15] Ren Ruoen, Wang Huiwen. Theory, Method and Example of Multivariate Statistical Data Analysis[M]. Beijing: National Defence and Industry Press, 1997. [任若恩, 王惠文. 多元统计数据分析—理论、方法、实例[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.]

Statistical Analysis of Surface Erosion Testing of Yinwu

Highway Slopes from Tongxin to Guyuan

LIM eng¹, ZHANG Hongjiang¹, WANG Xiaodong¹, JIANG Yulin²,
CHEN Zongwei², ZHANG Hongli¹

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract To study the surface erosion of highway slopes, Guyuan interchange in 2.5 km was selected as an experiment site. According to the different slope types and preventive measures, six experimental plots were set. Surface erosion of different slopes was measured by poker bar method. The process of rainfall was recorded by siphon recording rain gauge. The four factors of rainfall including rainfall amount, rainfall duration, rainfall intensity, ante-precipitation were measured. The results showed that the influence of rainfall on surface erosion was obvious. The decisive factors of effecting surface erosion were rainfall amount and rainfall intensity. The correlativity between amount of surface erosion and rainfall amount, rainfall intensity was obviously remarkable and remarkable. The correlativity between amount of surface erosion and ante-precipitation was contrarily remarkable. Valid regression equations were formulated between the surface erosion amount and principal component of factors of rainfall by Entermethod.

Key words highway slope, surface erosion, statistical analysis