

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.033.

黄俊, 金平伟, 姜学兵. 径流深和侵蚀量与集水面积、坡度及降雨量关系研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 135-142.

Huang Jun, Jin Pingwei, Jiang Xuebing. Study on the Relationship Between Runoff Depth, Erosion Yield and Catchment Area, Slope and Rainfall [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 135-142.

# 径流深和侵蚀量与集水面积、坡度及降雨量关系研究

黄俊<sup>1,2</sup>, 金平伟<sup>1,2</sup>, 姜学兵<sup>1,2</sup>

(1.珠江水利科学研究院, 广州 510610; 2.珠江流域水土保持监测中心站, 广州 510610)

**摘要:** [目的] 分析径流深、侵蚀量与集水面积、坡度等影响因子间定量关系, 为土壤侵蚀物理模型构建及参数率定提供参考。[方法] 基于不同下垫面措施野外径流小区天然降雨实测资料, 构建了年降雨径流深、侵蚀量多参数非线性估算模型。[结果] 降雨产流阈值随集水面积、坡度呈先减后增、先增后减的变化趋势。年径流深( $Y_1$ )和年土壤流失量( $Y_2$ )随面积呈先增后减变化趋势; $Y_1$ 随坡度呈先减小后迅速增加变化趋势, $Y_2$ 随坡度呈持续递增变化规律; $Y_1$ 和 $Y_2$ 随年降雨量持续增加。当坡面面积为 130 m<sup>2</sup>时, $Y_1$ 和 $Y_2$ 均达最大值;当坡度为 13.5°时, $Y_1$ 达最小值。 $Y_1$ 多参数非线性回归估算模型精度较好, 70% 数据点相对误差分布在±30% 内。[结论] 集水面积、坡度和年降雨量三者交互作用对年降雨径流深和侵蚀量影响作用最大;对于年降雨径流深和侵蚀量而言, 均存在临界集水面积和临界坡度值。

**关键词:** 积水面积; 坡度; 径流深; 土壤流失量

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0135-08

## Study on the Relationship Between Runoff Depth, Erosion Yield and Catchment Area, Slope and Rainfall

Huang Jun<sup>1,2</sup>, Jin Pingwei<sup>1,2</sup>, Jiang Xuebing<sup>1,2</sup>

(1. Pearl River Water Resources Research Institute, Guangzhou 510611, China;

2. Soil and Water Conservation Monitoring Center of Pearl River Basin, Guangzhou 510611, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to analyze the quantitative relationship between runoff depth, soil erosion, and factors such as catchment area and slope, to provide a scientific basis for the construction of physical models of soil erosion and the calibration of their parameters. [Methods] Based on measured field data of natural rainfall on runoff plots under different surface conditions, a multiple parameters nonlinear estimation model for annual rainfall runoff depth and soil erosion was established. [Results] The threshold of rainfall generating runoff initially decreased and then increased with the catchment area and slope before showing a trend of increasing followed by decreasing. The annual runoff depth ( $Y_1$ ) and annual soil loss ( $Y_2$ ) showed a pattern of first increase and then decrease with the increase in area.  $Y_1$  initially decreased and then rapidly increased with the slope while  $Y_2$  continuously increased with the slope. Both  $Y_1$  and  $Y_2$  increased with the increase in annual rainfall. When the slope area increased to 130 square meters, both  $Y_1$  and  $Y_2$  reached to their maximum values. When the slope was 13.5 degrees,  $Y_1$  reached to its minimum value. The multi-parameter nonlinear regression estimation model for  $Y_1$  was highly accurate, with 70% of the data points having a relative error within ±30%. [Conclusion] The interaction between catchment area, slope, and annual rainfall is the most significant in affecting annual rainfall runoff depth and erosion amounts. There exists a critical catchment area and a critical slope value for annual runoff depth and erosion amounts.

**Keywords:** catchment area; slope; runoff depth; soil loss

收稿日期: 2022-12-16

修回日期: 2023-06-13

资助项目: 长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2016389/KY); 广东省水利科技创新项目(2020-25); 水利技术示范项目(SF-202207)

第一作者: 黄俊(1983—), 男, 河南省新蔡县人, 高级工程师, 博士, 主要从事水土保持和遥感 GIS 研究。E-mail: jie1002520@sina.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

坡度及坡面集水面积是影响土壤侵蚀的重要因子<sup>[1-3]</sup>,二者与侵蚀量间定量关系是构建侵蚀物理模型的基础<sup>[4]</sup>。Lal 指出耕作措施小区侵蚀量随坡长呈幂函数增加,无耕作措施小区呈负相关线性递减<sup>[5]</sup>。美国通用土壤流失方程中侵蚀模数随坡长因子线性递增<sup>[6]</sup>,Liu 等在更大坡比(40%~60%)径流小区上也证实了这一结论<sup>[7]</sup>。Rejman 等基于 5~20 m 坡长径流小区发现土壤流失量随坡长增加逐渐降低<sup>[8]</sup>。Zhang 等指出在 0°~15°范围内侵蚀量随坡度增加而变大,并建立了侵蚀量与坡度正弦值间三次四项函数关系式<sup>[9]</sup>。Parsons 等基于 2~27 m 坡长径流小区研究发现,坡长为 7 m 时土壤流失量最大<sup>[10]</sup>。Chaplot 对比研究了 1 m<sup>2</sup>,10 m<sup>2</sup>不同坡比(2%~8%)径流小区泥沙变化情况,发现产流率随坡度、雨强逐渐递增;10 m<sup>2</sup>小区泥沙浓度随坡度增加而变大;1 m<sup>2</sup>小区径流泥沙浓度主要受溅蚀作用影响<sup>[11]</sup>。Chaplot 发现坡面尺度(<6 000 m<sup>2</sup>)土壤侵蚀模数与径流深随面积增加而降低,流域尺度(>6 000 m<sup>2</sup>)呈先增加后降低趋势<sup>[12]</sup>。Bagarello 等指出侵蚀模数随坡长增大而增加,但次降雨侵蚀总量与坡长无规律性关系<sup>[13]</sup>。因为,坡长增加导致细沟及细沟间侵蚀量呈不同变化规律。刘青泉等研究发现坡面流速及水流切应力随坡度先增后减,抗冲抗蚀性持续降低,认为土壤侵蚀临界坡度为 41.5°~50°<sup>[14-15]</sup>。Janeau 等在 1 m<sup>2</sup>小区上发现土壤稳渗率在 16%~63%坡比变化范围内,呈持续增加趋势<sup>[16]</sup>。黄俊等在 1 m<sup>2</sup>小区(5°~20°)通过人工模拟降雨发现土壤入渗率随坡度呈先增后减变化趋势<sup>[17-18]</sup>。

尽管国内外学者就此开展了大量研究,但由于问题本身复杂,且研究目的、试验条件差异,导致目前尚无统一认识<sup>[19-22]</sup>。本文基于野外径流小区实测数据,较为系统地探讨集水面积、坡度及年降雨量对径流侵蚀量的影响作用,定量分析坡面面积和坡度对次降雨产流阈值的影响,研究坡面集水面积、坡度及年降雨量与径流深和土壤流失量间变化关系,基于逐步回归分析法构建多因素非线性年径流深和年土壤流失量估算模型,并讨论多因素及其交互作用对二者影响。上述研究结果可为野外径流小区布设、土壤侵蚀物理模型构建及水土保持工程实践提供参考。

## 1 数据来源

本文数据来源于《2012 年全国水土流失动态监测与公告项目》珠江流域 4 个典型小流域野外径流小区 2021 年自然降雨实测资料,分别为云南省尖山河和摩布小流域、贵州省马脖子小流域和广东省源坑水小流域。上述 4 个小流域土壤质地较为接近,主要为红壤或黄壤,土壤黏粒含量偏低(<15%),砂粒含量相对较高(≥45%),且有机质含量较为匮乏(<5%)。各径流小区已正常运行多年,所选择小区的立地条件以灌木、果木和乔木为主,植被覆盖度已基本稳定;各径流小区所在区域 2021 年降雨数据与多年平均值较为接近,无极端降雨发生。因此,各径流小区植被覆盖状况与降雨特征能够反映一般性特征规律,具有较强的代表性。上述 4 个小流域野外各径流小区具体参数详见表 1。

表 1 各小流域径流小区基本参数

Table 1 Basic parameters of runoff plots in each sub-catchment

小流域名称	地理位置	主要土壤类型	小区集水面积/m <sup>2</sup>	坡度/(°)	立地条件	覆盖度/%	多年平均降雨量/mm
尖山河	24.58°N,102.83°E	红泥紫土 红壤	100	15	人工林(1)	48.3	1050
				20	灌草地(2)	66.9	
				25	次生林(1)	44.1	
摩布	26.31°N,104.54°E	红壤	50	10	经果林(3)	45.3	649.6
				20	水保林(4)	55.7	
				100	经果林(3)	46.3	
马脖子	26.08°N,104.85°E	黄壤 红壤	100	20	水保林(4)	54.7	1370
				25	经果林(5)	34.2	
			200	35	灌草地(6)	70.4	
				25	经果林(5)	40.2	
源坑水	24.10°N,115.61°E	红壤	100	35	灌草地(6)	75.4	1442
				25	灌草地(7)	72.4	
				30	人工林(8)	44.4	

注:(1) 云南松、桉树和杨梅等;(2) 紫茎泽兰、杜鹃等;(3) 桃树和杨梅等;(4) 滇柏、云南松和华山松等;(5) 梨树等;(6) 车桑子、火棘、黄杆草、羊角草等;(7) 桃金娘、岗松、糖蜜草、芒萁等;(8) 马尾松、桉树和樟树等。表中覆盖度一栏为年平均值。

2 结果与分析

2.1 集水面积、坡度对坡面降雨产流阈值的影响

降雨产流阈值是坡面能够产流的最小降雨量,是坡面降雨径流调控及雨水资源利用研究的基础<sup>[23-24]</sup>。本文基于直线回归法计算各径流小区次降雨坡面降雨产流阈值,公式如下:

$$r=q_1(p-q_2)+\delta \tag{1}$$

式中: $r$ 和 $p$ 分别表示次(降雨)径流深(mm)和次降雨量(mm); $q_1$ 和 $q_2$ 分别为径流系数和降雨产流阈值(mm); $\delta$ 为误差项。当次降雨量较小时( $<10\text{ mm}$ ),由方程(1)得到的降雨产流阈值误差较大。因此,本文计算时仅将次降雨量 $\geq 12\text{ mm}$ 的降雨事件纳入计算范围。

图 1 为不同集水面积、坡比次径流深与次降雨量散点图,次径流深随次降雨量增加呈显著的线性递增变化规律。表 2 为不同面积和坡比降雨产流阈值“直线回归法”拟合方程结果,各拟合方程决定系数均大于 90%,且达到极显著水平。次降雨径流系数( $q_1$ )随面积、坡比增加分别呈逐渐递减、逐渐递增的变化趋势, $q_1$ 变化范围为 35.5%~81.5%。相同次降雨量的变化,在集水面积较小或坡比较大的坡面引起次径流深变化最大。由图 1B 可以看出,坡比为 17.6%和 26.8%,36.4%和 46.6%拟合方程直线基本重合,这表明坡度在 $[10^\circ\sim 15^\circ]$ , $[20^\circ\sim 25^\circ]$ 区间范围内,坡度变化对次径流深和次降雨量关系影响作用较小。坡面降雨产流阈值( $q_2$ )随集水面积增加呈先减小后增大变化趋势,随坡度增加呈先增加后降低变化趋势, $q_2$ 变化范围为 8.07~18.82 mm。

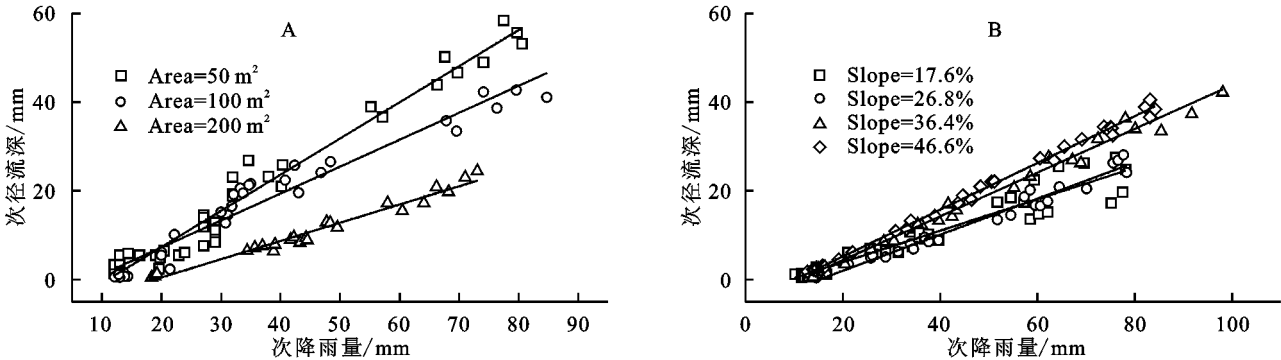


图 1 不同集水面积及坡度次径流量与次降雨量散点图

Fig. 1 Scatter plot of runoff volume versus rainfall volume for different catchment areas and slopes

表 2 不同坡面集水面积及坡比坡面降雨产流阈值拟合方程

Table 2 Fitting equation for the rainfall runoff threshold with different catchment areas and slope ratios					
参数	样本数	拟合方程	决定系数	均方根误差	降雨产流阈值/mm
集水面积/m <sup>2</sup>	50	Y=0.815X-8.944	0.9660	3.2408	10.97
	100	Y=0.607X-4.896	0.9486	3.0269	8.07
	200	Y=0.411X-7.736	0.9717	1.1428	18.82
坡比/%	17.6	Y=0.355X-3.200	0.9076	2.6176	9.01
	26.8	Y=0.407X-6.167	0.9724	1.7885	15.15
	36.4	Y=0.493X-5.476	0.9873	5.6241	11.11
	46.6	Y=0.527X-5.353	0.9962	7.3759	10.16

注:表中 Y 和 X 分别为次降雨径流深(mm)和次降雨量(mm)。

2.2 年径流深和土壤流失量与各影响因子间定量关系

$Y_1$ 和 $Y_2$ 随集水面积增加呈先增加后减小的变化趋势(图 2A,B),可采用开口向下二次抛物线对其变化关系(曲线 I 和 II)进行回归拟合,结果如表 3 所示。 $Y_1$ 和 $Y_2$ 回归方程决定系数均超过 90%,且达到极显著水平,但 $Y_2$ 拟合方程误差远大于 $Y_1$ 拟合方程。对 $Y_1$ 和 $Y_2$ 拟合方程求一阶导数,可得 $Y_1$ 和 $Y_2$ 达到最大值的坡面面积,分别为 127.3 m<sup>2</sup>,128.1 m<sup>2</sup>。这说明在坡面尺度<sup>[25]</sup>,当坡面汇水面积为 130 m<sup>2</sup>左右时坡面 $Y_1$ 和 $Y_2$

均达最大值,可为水土保持野外定位观测试验小区布设提供参考。随小区坡度增加, $Y_1$ 呈先递减后增加变化趋势(图 2C), $Y_2$ 呈持续增加变化规律(图 2D)。表 3 给出 $Y_1$ 、 $Y_2$ 与坡度拟合方程,对曲线(3)拟合方程求一阶导数可知坡度为 13.5°时, $Y_1$ 达最小值,此后 $Y_1$ 迅速增大。由图 2D 可以看出,当坡度 $<21.8^\circ$ , $Y_2$ 增加速率较为缓慢(如直线 V 所示);当坡度 $>21.8^\circ$ ,推移质及悬移质泥沙颗粒重量沿坡面方向分量急剧递增,使得土壤流失量迅速增加(如直线 VI 所示)。直线

V 和 VI 交点对应坡度(20.5°)可认为是  $Y_2$  随坡度变化速率的拐点。降雨是影响坡面侵蚀产沙的最直接因素<sup>[26]</sup>。由图 2E 和 2F 可以看出,随年降雨量增加  $Y_1$  和  $Y_2$  均持续递增。与坡度对  $Y_2$  影响作用类似,存在

随年降雨量增加  $Y_1$  和  $Y_2$  增加速率突变拐点,即直线 VII 和 VIII, XI 和 XII 交点所对应年降雨量,分别为 1 231.6 mm 和 1 226.3 mm。表明大于 1 200 mm 年降雨量将引起坡面径流及侵蚀总量迅速增大。

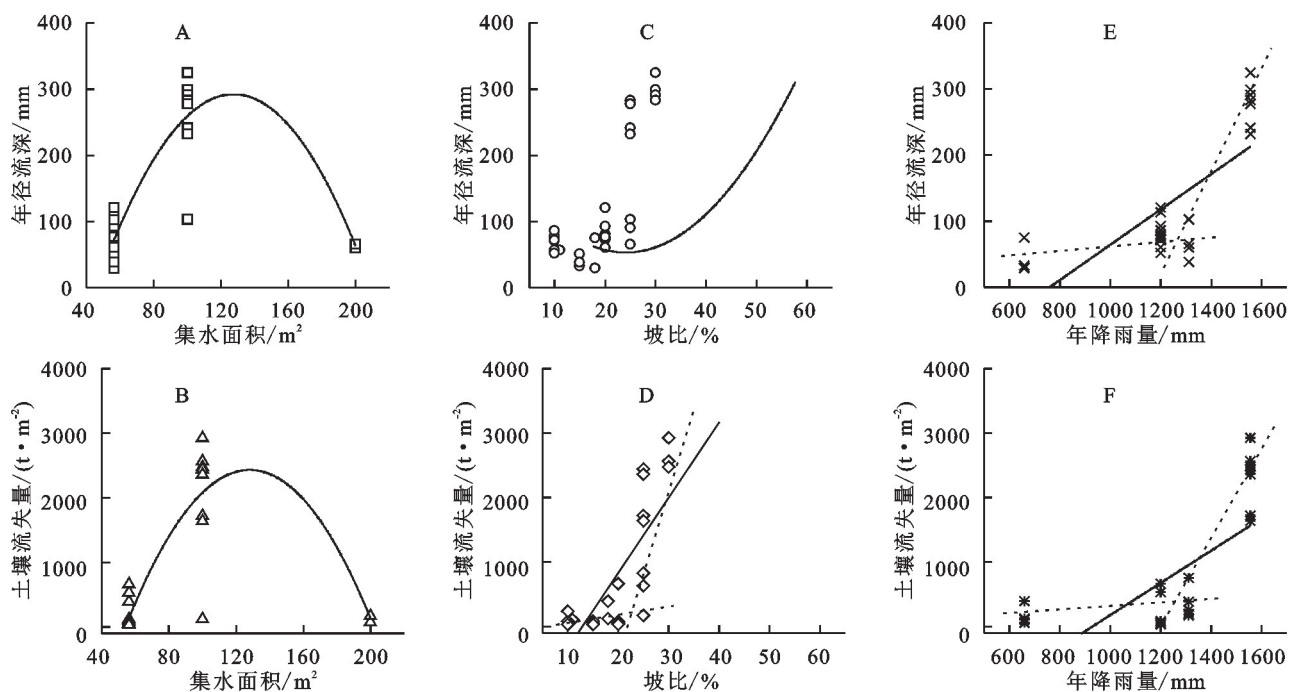


图 2 集水面积( $X_1$ )、坡比( $X_2$ )、年降雨量( $X_3$ )与年径流深( $Y_1$ )和年土壤流失量( $Y_2$ )散点图

Fig. 2 Scatter plot of catchment area ( $X_1$ ), slope ratio ( $X_2$ ), and annual rainfall ( $X_3$ ) versus annual runoff depth ( $Y_1$ ) and annual soil loss amount ( $Y_2$ )

表 3 集水面积、坡度及年降雨量与年径流深和土壤流失量拟合方程

Table 3 Fitting equations for the relationship between catchment area, slope, annual rainfall, and annual runoff depth and soil loss amount

曲(直)线 编号	样本数	拟合 方程	决定 系数 $R^2$	显著 水平 $p$	均方根 误差
I	29	$Y_1 = -0.0436X_1^2 + 11.1X_1 - 415.4$	0.82671		40.0
II	29	$Y_2 = -0.4455X_1^2 + 114.1X_1 - 4871.6$	0.79070		463.3
III	29	$Y_1 = 0.228X_2^2 - 11X_2 + 185.9$	0.76815		46.5
IV	29	$Y_2 = 117.1X_2 - 1517.1$	0.64959		593.2
V	21	$Y_2 = 14.7X_2 - 83.1$	0.30387		193.9
VI	19	$Y_2 = 246.2X_2 - 4766.4$	0.75308	$\leq 0.0096$	530.2
VII	29	$Y_1 = 0.2673X_3 - 202.9$	0.58198		62.2
VIII	21	$Y_1 = 0.0816X_3 - 23.6$	0.78198		9.8
IX	25	$Y_1 = 0.5715X_3 - 620.3$	0.85786		36.2
X	29	$Y_2 = 2.5X_3 - 2324.6$	0.47754		717.7
XI	21	$Y_2 = 0.1279X_3 + 50.9$	0.01863	0.5552	213.3
XII	25	$Y_2 = 6.2707X_3 - 7497.8$	0.89033	0.0000	342.8

### 2.3 年径流深和土壤流失量多参数非线性估算模型

集水面积( $X_1$ )、坡度( $X_2$ )及年降雨量( $X_3$ )三因素间是互相独立的。由概率论基本原理可知,三因素与年径流深( $Y_1$ )和年土壤流失量( $Y_2$ )间分别构成了典型乘法事件,即三者交互作用对  $Y_1$  和  $Y_2$  的影响,

具体表达式如下:

$$f_{123}(Y) = \alpha \times X_1 \times X_2 \times X_3 + \beta \quad (2)$$

坡面面积、坡度及年降雨量两两间交互作用对  $Y_1$  和  $Y_2$  的影响作用可表示为:

$$f_{12}(Y) = \chi \times X_1 \times X_2 + \delta \quad (3)$$

$$f_{13}(Y)=\epsilon\times X_1\times X_3+\varphi\tag{4}$$

$$f_{23}(Y)=\varphi\times X_2\times X_3+\gamma\tag{5}$$

此外,单因素对  $Y_1$  和  $Y_2$  的影响作用可表示为:

$$f_1(Y)=\eta g(X_1)+\iota\tag{6}$$

$$f_2(Y)=\kappa g(X_2)+\lambda\tag{7}$$

$$f_3(Y)=\mu g(X_3)+\nu\tag{8}$$

其中函数  $g(X_1)$ 、 $g(X_2)$  和  $g(X_3)$  具体表达式采用前面章节回归分析结果。

不同影响作用项间采用线性叠加关系,最后得到  $Y_1$  和  $Y_2$  与  $X_1$ 、 $X_2$  及  $X_3$  间数学表达式为:

$$f(Y)=f_{123}(Y)+f_{12}(Y)+f_{13}(Y)+f_{23}(Y)+f_1(Y)+f_2(Y)+f_3(Y)\tag{9}$$

采用 Matlab<sup>®</sup> 7.13 软件包 stepwise 命令,基于公式(9)分别对  $Y_1$  和  $Y_2$  进行逐步回归分析,通过参数  $t$  检验剔除未通过显著性检验的因子作用项,得到  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  以及交互作用项与  $Y_1$  和  $Y_2$  定量函数关系,即  $Y_1$  和  $Y_2$  多参数非线性估算模型,结果如表 4 所

示。为减少各因子量纲及数量级差异引起的误差,对实测数据进行无量纲化处理,公式如下:

$$X_i=(x_{\max}-x_i)/(x_{\max}-x_{\min})\tag{10}$$

式中: $X_i$  和  $x_i$  为无量纲化处理和未处理原始数据系列; $x_{\max}$  和  $x_{\min}$  分别为原始数据系列中的最大和最小值; $i$  为数据系列长度。

对于  $Y_1$  估算模型而言, $X_1$ 、 $X_2$  与  $X_3$  三者交互对  $Y_1$  影响作用最大,且通过显著性  $t$  检验。 $X_2$  与  $X_1$ 、 $X_3$  两两交互作用项也通过了显著性检验。虽  $X_1$  单因素与  $Y_1$  相关性很好( $r=0.9092$ ),但在多因子交互模型中,并未通过显著性检验,这表明  $X_1$  对  $Y_1$  的影响主要通过与其他因素交互作用而产生的。 $Y_1$  估算模型决定系数超过 98%,均方根误差小于 7%,且达到了极显著水平。由图 3A 可以看出, $Y_1$  实测数据与模型估算结果均匀分布在 1:1 直线两侧,二者线性回归方程决定系数超过了 99%,且均方根误差仅为 18.5,年径流深估算模型精度较高。

表 4 年径流深与年土壤流失量多参数非线性估算模型

Table 4 Multi-parameter nonlinear estimation model for annual runoff depth and annual soil loss amount

对年径流深( $Y_1$ )有显著影响作用项	系数值	$t$ 值	显著水平 $p$	参数估计误差
$X_2$ (坡度)	2.7163	6.8338	0.0000	0.3975
$X_1\times X_2$ (坡面面积 $\times$ 坡度)	-10.9070	-8.7677		1.2440
$X_2\times X_3$ (坡度 $\times$ 年降雨量)	-3.7627	-5.8022		0.6485
$X_1\times X_2\times X_3$ (坡面面积 $\times$ 坡度 $\times$ 年降雨量)	11.3660	8.45700		1.3440
模型参数		截距	1.5070	
		决定系数 $R^2$	0.9627	
		$F$ 值	148.4900	
		显著水平 $p$	0.0000	
		均方根误差 RMSE	0.0690	
对年土壤流失量( $Y_2$ )有显著影响作用项	系数值	$t$ 值	显著水平 $p$	参数估计误差
$X_1^2$ (坡面面积 <sup>2</sup> )	-3.2245	-7.5125	$\leq 0.004$	0.4292
$X_2\times X_3$ (坡度 $\times$ 年降雨量)	-1.5903	-4.0789		0.3899
$X_1\times X_2\times X_3$ (坡面面积 $\times$ 坡度 $\times$ 年降雨量)	4.2843	6.84130		0.6262
模型参数		截距	1.5004	
		决定系数 $R^2$	0.9297	
		$F$ 值	105.7300	
		显著水平 $p$	0.0000	
		均方根误差 RMSE	0.0993	

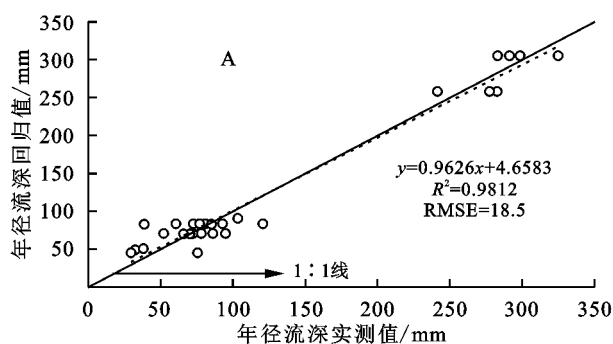
对于  $Y_2$  估算模型而言, $X_2$  和  $X_3$  单因素作用项均未通过  $t$  检验,说明二者对年侵蚀量影响均是通过与  $X_1$  交互作用或二者间交互作用产生的。三因素交互作用项( $X_1\times X_2\times X_3$ )对  $Y_2$  影响作用最大, $X_2$  和  $X_3$  的交互作用项也通过  $t$  检验达到极显著水平。 $Y_2$  估算模型决定系数超过了 97%,均方根误差相对较小,且达到了极

显著水平。图 3B 为  $Y_2$  实测数据与估算结果散点图,二者线性回归方程决定系数超过了 95%,但与  $Y_1$  估算模型相比,其均方根误差相对偏大,说明坡面年土壤流失量的模拟与计算仍需考虑其他因素影响。

2.4 讨论

坡面面积、坡度和年降雨量及交互作用对径流侵

蚀量影响作用机理较为复杂,对于有植被措施坡面更是如此。当坡面面积较小时( $X_1=50\text{ m}^2$ ),流路相对较短,径流入渗量相对较少,降雨主要转化为坡面径流量。因此,坡面径流系数相对较大( $q_1=81.5\%$ );由于流路相对较短,坡面流速较低,其水流侵蚀携沙能力较差,坡面产沙及输沙能力相对较低( $Y_2$ 平均值 =  $135\text{ t/m}^2$ )。随坡面面积增加( $X_1=100\text{ m}^2$ ),坡面汇水面积变大,虽年径流深得到一定程度增加( $Y_1$ 平均值 =  $260\text{ mm}$ ),但径流系数呈降低趋势( $q_1=60.7\%$ )。同时,由于流路变长,水流流速增加,导致其侵蚀携沙能力增强,土壤流失量变大( $Y_2$ 平均值 =  $2\ 080\text{ t/m}^2$ ),这一阶段侵蚀现象主要以“侵蚀—搬运”过程为主。



Zingg 基于观测资料汇总发现土壤侵蚀模数与坡长和坡度间存在正相关幂函数关系,也就是如前所述的“侵蚀—搬运”阶段<sup>[27]</sup>。当坡面面积超过一定阈值后( $X_1=200\text{ m}^2$ ),将引起两方面变化:(1) 径流入渗量大幅增加<sup>[28-29]</sup>,导致径流系数和年径流深均迅速降低( $q_1=41.1\%$ ,  $Y_1$ 平均值 =  $63\text{ mm}$ );(2) 流路增加,导致水流克服流路沿程阻力消耗大部分能量,其侵蚀携沙能力下降,加之径流量降低,使得坡面土壤流失量( $Y_2$ 平均值 =  $123\text{ t/m}^2$ )迅速下降<sup>[2,21]</sup>,这一阶段侵蚀现象主要以“侵蚀—搬运—沉积”为主,这与 Walling 研究结果一致,流域尺度侵蚀模数随面积增加而逐渐降低<sup>[30]</sup>。

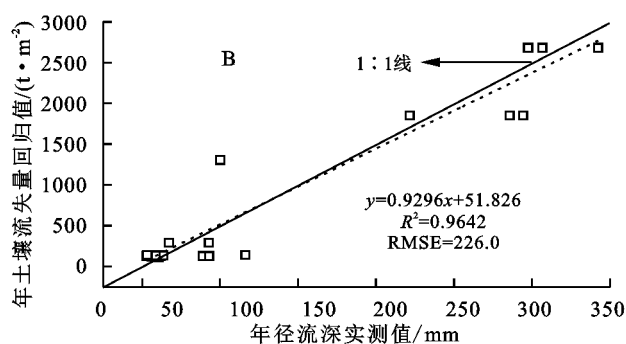


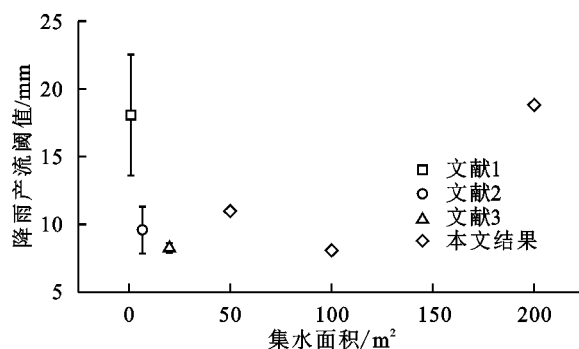
图 3 年径流深和土壤流失量多参数非线性估算模型检验

Fig. 3 Validation of the multi-parameter nonlinear estimation model for annual runoff depth and soil loss amount

图 4 为本文降雨产流阈值结果与尺寸更小的径流小区研究结果的对比分析。与本文分析结果基本一致,降雨产流阈值随面积增加呈先减后增的变化趋势。当坡面面积较小时,面积增加导致坡面汇水面积扩大,使得坡面能够产生径流的降雨量阈值一定程度上下降,但随着面积持续递增,土壤入渗量也变大,需要更多降雨才能使得坡面产生径流。对图 4 中散点进行回归拟合,得到降雨产流阈值与坡面面积关系式  $q_2=0.0008X_1^2-0.1373X_1+13.745$  ( $R^2=0.6285$ ),最小降雨产流阈值对应的坡面面积为  $85.8\text{ m}^2$ ,与本文得到的  $101.6\text{ m}^2$  基本接近,说明坡面面积为  $90\sim 100\text{ m}^2$  左右时坡面降雨产流阈值最小。

坡度或坡比是影响坡面水土流失的关键因素之一,但目前仍无统一论,加上多次降雨后土壤发生结皮等因素使得此问题更为复杂。有文献在约  $1\text{ m}^2$  微型土槽模拟试验发现次降雨径流量随坡度呈先递减后增加的变化规律<sup>[17]</sup>。本文结果表明坡度为  $10^\circ\sim 30^\circ$  范围内,土壤流失量随坡度持续增加,这与文献<sup>[33-34]</sup>研究结果基本一致。文献<sup>[34]</sup>结果表明,坡度为  $15.6^\circ$  左右是土壤流失量增加速率的拐点,略小于本文结果。当坡度初始值相对较小( $<11.3^\circ$ )时,坡度增加导致坡面水流重力沿垂直坡面分量变大,坡

面水深增加,坡面形成有压入渗条件使得径流入渗量变大,在一定降雨条件下,坡面径流量反而降低。当坡度增大到一定数值( $16.7^\circ\sim 21.8^\circ$ )时,水流重力沿垂直坡面分量迅速下降,沿坡面方向迅速增大,水深降低、流速变大,导致径流量增加。坡面坡度增加导致坡面推移质和悬移质泥沙颗粒重力沿坡面方向分量持续递增,虽一定程度上坡度增加导致水流输沙及推移能力有所降低<sup>[15]</sup>,但总体上仍导致坡面土壤流失量持续增加。



注:文献 1 见参考文献[24],文献 2 见参考文献[31],文献 3 见参考文献[32]。

图 4 不同集水面积降雨产流阈值散点图

Fig. 4 Scatter plot of rainfall runoff threshold for different catchment areas

### 3 结论

(1) 次降雨径流系数随集水面积增加逐渐降低,随坡度增加呈逐渐递增的变化趋势。坡面降雨产流阈值随面积增加呈先减后增的变化趋势,随坡度增加呈先增后减的变化趋势。坡面集水面积为 90~100 m<sup>2</sup> 时,坡面次降雨产流阈值最小。

(2) 年径流深和土壤流失量随集水面积呈先增后减变化趋势,当面积为 127.3 m<sup>2</sup>, 128.1 m<sup>2</sup> 时年径流深和土壤流失量达最大值。年径流深随坡度呈先减后增变化趋势,当坡度为 13.5° 时,年径流深达最小值;年土壤流失量随坡度增加持续递增,坡度小于 20.5° 时,土壤流失量增加速率较慢,而后土壤流失量迅速增加。年径流深和土壤流失量随年降雨量持续递增,年径流深和土壤流失量增加速率变化拐点对应的年降雨量分别为 1 231.6 mm 和 1 226.3 mm。

(3) 基于逐步回归分析法筛选了对年径流深和土壤流失量有显著影响作用的因子及交互作用项,集水面积、坡度和年降雨量三者交互作用对年径流深和土壤流失量影响作用最大。建立了年径流深和土壤流失量多参数非线性估算模型,年径流深估算模型精度较高,超过 70% 数据点相对误差在 ±30% 内;年土壤流失量模型估算精度相对较低,50% 数据点相对误差超过了 ±30%。

#### 参考文献(References):

- [1] Kinnell P I A, Cummings D. Soil/slope gradient interactions in erosion by rain-impacted flow[J]. Transactions of the ASAE(USA), 1993,36(2):381-387.
- [2] Poesen J W, Torri D, Bunte K. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales:a review[J]. Catena, 1994,23(1-2):141-166.
- [3] Smets T, Poesen J, Knapen A. Spatial scale effects on the effectiveness of organic mulches in reducing soil erosion by water[J]. Earth-Science Reviews, 2008,89(1/2):1-12.
- [4] 王盛萍,姚安坤,赵小婵.基于人工降雨模拟试验的坡面水文连通性[J].水科学进展,2014,25(4):526-533.  
Wang S P, Yao A K, Zhao X C. Analyzing hydrological connectivity for a slope-surface on the basis of rainfall simulation experiment[J]. Advances in Water Science, 2014,25(4):526-533.
- [5] Lal R. Effect of slope length, slope, gradient, tillage methods and cropping systems and run-off and soil erosion on a Tropical Alfisol:Preliminary results[J]. IAHS Publ, 1988,174:79-88.
- [6] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [M]. Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.
- [7] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64(5):1759-1763.
- [8] Rejman J, Brodowski R. Rill characteristics and sediment transport as a function of slope length during a storm event on loess soil[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2005,30(2):231-239.
- [9] Zhang K L, Hosoyamada K. Influence of slope gradient on interrill erosion of Shirasu soil[J]. Journal of the Japanese Society of Soil Physics, 1996,73:37-44.
- [10] Parsons A J, Brazier R E, Wainwright J, et al. Scale relationships in hillslope runoff and erosion[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2006,31(11):1384-1393.
- [11] Chaplot V, Le Bissonnais Y. Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2000,25(2):145-153.
- [12] Chaplot V, Poesen J. Sediment, soil organic carbon and runoff delivery at various spatial scales[J]. Catena, 2012,88(1):46-56.
- [13] Bagarello V, Ferro V. Analysis of soil loss data from plots of differing length for the Sparacia experimental area, Sicily, Italy[J]. Biosystems Engineering, 2010,105(3):411-422.
- [14] Liu Q Q, Singh V P. Effect of microtopography, slope length and gradient, and vegetative cover on overland flow through simulation[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2004,9(5):375-382.
- [15] 刘青泉,陈力,李家春.坡度对坡面土壤侵蚀的影响分析[J].应用数学和力学,2001,22(5):449-457.  
Liu Q Q, Chen L, Li J C. Influences of slope gradient on soil erosion[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2001,22(5):449-457.
- [16] Janeau J L, Bricquet J P, Planchon O, et al. Soil crusting and infiltration on steep slopes in northern Thailand[J]. European Journal of Soil Science, 2003,54(3):543-554.
- [17] Huang J, Wu P T, Zhao X N. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments[J]. Catena, 2013,104:93-102.
- [18] 黄俊,吴普特,赵西宁.坡面生物调控措施对土壤水分入渗的影响[J].农业工程学报,2010,26(10):29-37.  
Huang J, Wu P T, Zhao X N. Impact of slope biological losses: A guide to conservation planning [M]. Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.

- cal regulated measures on soil water infiltration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(10): 29-37.
- [19] Adekalu K, Olorunfemi I, Osunbitan J. Grass mulching effect on infiltration, surface runoff and soil loss of three agricultural soils in Nigeria[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(4): 912-917.
- [20] Poesen J, Savat J. Detachment and transportation of loose sediments by raindrop splash: Part II detachability and transport ability measurements[J]. Catena, 1981, 8(1): 19-41.
- [21] Smets T, Poesen J, Bochet E. Impact of plot length on the effectiveness of different soil-surface covers in reducing runoff and soil loss by water[J]. Progress in Physical Geography, 2008, 32(6): 654-677.
- [22] 蒋定生, 黄国俊. 地面坡度对降水入渗影响的模拟试验[J]. 水土保持通报, 1984, 4(4): 10-13.  
Jiang D S, Huang G J. Simulation experiment on the influence of ground slope on precipitation infiltration[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1984, 4(4): 10-13.
- [23] Li X Y, Liu L Y, Gao S Y, et al. Microcatchment water harvesting for growing *Tamarix ramosissima* in the semiarid loess region of China[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 214(1/2/3): 111-117.
- [24] 黄俊, 吴普特, 赵西宁. 多参数非线性降雨产流阈值模型试验研究[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(1): 84-89.  
Huang J, Wu P T, Zhao X N. Experimental study on the nonlinear multi-parameter rainfall-runoff threshold model[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 33(1): 84-89.
- [25] Cammeraat E L H. Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response of a semi-arid catchment in southeast Spain[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2004, 104(2): 317-332.
- [26] Zhao X, Huang J, Gao X, et al. Runoff features of pasture and crop slopes at different rainfall intensities, antecedent moisture contents and gradients on the Chinese Loess Plateau: A solution of rainfall simulation experiments[J]. Catena, 2014, 119: 90-96.
- [27] Zingg A W. Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff[J]. Agric. Engng., 1940, 21: 59-64.
- [28] Van de Giesen N, Stomph T J, Ajayi A E, et al. Scale effects in Hortonian surface runoff on agricultural slopes in West Africa: Field data and models[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 142(1/2): 95-101.
- [29] Puigdefabregas J, del Barrio G, Boer M M, et al. Differential responses of hillslope and channel elements to rainfall events in a semi-arid area[J]. Geomorphology, 1998, 23(2/3/4): 337-351.
- [30] Walling D E. The sediment delivery problem[J]. Journal of Hydrology, 1983, 65(1/2/3): 209-237.
- [31] Schreiber H A, Kincaid D R. Regression models for predicting on-site runoff from short-duration connective storms[J]. Water Resources Research, 1967, 3(2): 389-395.
- [32] 李小雁, 龚家栋, 高前兆. 人工集水面临界产流降雨量确定实验研究[J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 516-522.  
Li X Y, Gong J D, Gao Q Z. Experimental study on threshold rainfall determination for artificial rainwater-harvesting catchments[J]. Advances in Water Science, 2001, 12(4): 516-522.
- [33] 胡世雄, 靳长兴. 坡面土壤侵蚀临界坡度问题的理论与实验研究[J]. 地理学报, 1999, 54(4): 347-356.  
Hu S X, Jin C X. Theoretical analysis and experimental study on the critical slope of erosion[J]. Acta Geographica Sinica, 1999, 54(4): 347-356.
- [34] 张光科, 方铎. 坡面径流侵蚀量随坡度变化规律初探[J]. 水文, 1996, 16(6): 46-49.  
Zhang G K, Fang D. Preliminary study on the variation law of slope runoff erosion with slope[J]. Hydrology, 1996, 16(6): 46-49.