

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.026.

梁止水, 陈煜, 孙悦, 等. 砒砂岩坡面侵蚀产沙规律及多元回归估算模型研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 11-17.

Liang Zhishui, Chen Yu, Sun Yue, et al. Study on the Pattern of Erosion and Sediment Yield and Multiple Regression Estimation Model of Pisha Sandstone Slope[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 11-17.

# 砒砂岩坡面侵蚀产沙规律及多元回归估算模型研究

梁止水<sup>1</sup>, 陈煜<sup>1</sup>, 孙悦<sup>1</sup>, 高海鹰<sup>1</sup>, 吴智仁<sup>2</sup>

(1. 东南大学 土木工程学院, 南京 210096; 2. 江苏大学 环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** [目的] 揭示砒砂岩坡面侵蚀产沙规律并初步建立侵蚀产沙估测模型, 为创新砒砂岩区水土流失综合治理新措施提供参考。[方法] 利用室内人工模拟降雨试验, 依据 18 个工况的试验数据, 定量研究了不同降雨强度、植被覆盖度和坡度 3 个因素对砒砂岩坡面降雨侵蚀产沙量的影响规律, 并通过多元非线性回归方程建立了坡面侵蚀产沙预测模型。[结果] (1) 砒砂岩坡面产沙规律曲线均属于平缓型, 每分钟产沙量随降雨历时呈现逐渐增大并直至稳定。(2) 坡面产沙量受降雨强度的影响最为强烈, 植被其次, 坡度最小, 且降雨强度对植被的减沙效益具有一定的影响, 随着降雨强度的增加, 低覆盖度的植被减沙效益降低。(3) 产沙量同降雨强度呈幂函数关系, 而同坡度和植被覆盖度在一定范围内呈线性关系。[结论] 通过多元非线性回归方程所建立的侵蚀产沙估算方程的拟合相关系数( $R^2$ )可达到 0.980, 可以有效反映坡面侵蚀产沙量与各个影响因素的相互关系, 具有较高的适用性。

**关键词:** 砒砂岩; 模拟降雨; 侵蚀产沙; 多元非线性模型

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0011-07

## Study on the Pattern of Erosion and Sediment Yield and Multiple Regression Estimation Model of Pisha Sandstone Slope

Liang Zhishui<sup>1</sup>, Chen Yu<sup>1</sup>, Sun Yue<sup>1</sup>, Gao Haiying<sup>1</sup>, Wu Zhiren<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to explore the pattern of erosion on Pisha sandstone slope and establish the estimation model, and to provide reference for innovating the new measures of soil erosion control in Pisha sandstone area. [Methods] The effects of rainfall intensity (20, 50 and 80 mm/h), vegetation coverage (10%, 30% and 50%) and slope (20°, 30° and 40°) on sediment yield pattern were examined, and an estimation model of erosion and sediment yield on slope was established through multiple nonlinear regression equation. [Results] The sediment yield curve of the Pisha sandstone slope appeared a gentle growth, and the sediment yield in per minute increased gradually with the duration of rainfall and then became stable. Among the factors, the sediment yield was most strongly affected by rainfall intensity, followed by vegetation, and the smallest effect factor is slope. Additionally, the sediment reduction efficiency of vegetation was also affected by rainfall intensity. As rainfall intensity increased, the sediment reduction efficiency of vegetation with low coverage decreased. The sediment yield had a power function relationship with rainfall intensity, while it had a linear relationship with slope gradient and vegetation coverage within a certain range. A multivariate nonlinear regression model for erosion and sediment yield of Pisha sandstone slope was established. [Conclusion] The fitting correlation coefficient  $R^2$  of the established erosion and sediment yield estimation equation reaches 0.980 under the specific conditions of the standard plot, which can

收稿日期: 2023-02-19

修回日期: 2023-04-08

资助项目: 国家自然科学基金(42207394); 江苏省自然科学基金(BK20190348); 国家重点研发计划课题(2017YFC0504505); 广西重点研发计划项目(桂科 AB21196048); 中央财政林草科技推广示范项目(2023-TG17)

第一作者: 梁止水(1988—), 男, 河南商丘人, 博士, 副研究员, 主要从事水土保持与生态修复研究。E-mail: zs\_liang@seu.edu.cn

<http://stbcj.paperonice.org>

effectively reflect the relationship between slope erosion and sediment yield and various influencing factors, and the estimation model has high applicability.

**Keywords:** Pisha sandstone; simulated rainfall; sediment yield; nonlinear mode

黄河流域砒砂岩区处于黄土高原到西北沙漠类型的过渡区,环境异质性极为突出,生态退化和水土流失非常严重,侵蚀模数可达到 30 000~40 000 t/(km<sup>2</sup>·a),是我国乃至世界上侵蚀最为剧烈的地区之一,也是黄河下游“地上悬河”的粗泥沙来源核心区<sup>[1]</sup>。长期以来,砒砂岩区被列为国家生态环境建设和水土流失治理的重点区,水土流失防治取得了较为显著的治理成效<sup>[2-4]</sup>。

针对砒砂岩的水力侵蚀,主要集中在冲刷条件下的坡面侵蚀规律和水力学特征。其中:苏涛等<sup>[5-6]</sup>利用室内和野外径流冲刷试验研究了砒砂岩坡面的侵蚀规律和径流水动力学特性。杨吉山等<sup>[7]</sup>通过野外放水冲刷试验对比研究了白色和红色原状砒砂岩坡面的产流、产沙过程,分析了砒砂岩剥蚀率与水力学参数之间的相似关系。Liang 等<sup>[8]</sup>采用室内模拟降雨试验分析了不同降雨强度、坡度、植被覆盖率条件下的产沙规律。杨振奇等<sup>[9]</sup>运用系统聚类 and 线性回归相结合的方法,划分裸露砒砂岩区降雨类型,研究了不同降雨类型对裸露坡面产流和产沙的影响,分析了不同降雨条件下坡面的微地形变化规律。李龙等<sup>[10]</sup>研究了自然降雨条件下砒砂岩坡面细沟微形态及其侵蚀特征,分析了细沟微形态变化过程对产流产沙的影响。董晓宇等<sup>[11]</sup>采用野外原位模拟冲刷试验研究了裸露砒砂岩区坡面侵蚀过程中地表粗糙度与水力侵蚀特征参数的关系。然而针对砒砂岩坡面的水土流失模拟及侵蚀产沙预测模型等研究较少,其中只有叶俊道等<sup>[12]</sup>对 WEPP 模型在砒砂岩地区不同坡面的土壤侵蚀进行了适用性探讨。因此,亟需针对砒砂岩坡面的特点建立适用于该地区的产沙过程预报模型。

为了更好地研究砒砂岩坡面在降雨侵蚀作用下侵蚀产沙规律,本文开展室内模拟降雨试验,研究不同砒砂岩边坡的坡度、降雨强度及植被覆盖率条件下的侵蚀产沙量,利用多元回归分析方法,分析不同参数与侵蚀产沙量之间的相互关系,初步建立侵蚀产沙估测模型,以期对砒砂岩水土流失区治理工作提供一定的科学依据。

## 1 材料及方法

### 1.1 试验材料

试验用砒砂岩土取自黄河中游上游皇甫川流域的圪秋沟,含水量约为 9.0%,土壤颗粒级配使用马尔

文 3000 激光粒度仪测定,>1.00 mm 的颗粒组成占 0.83%,0.50~0.05 mm 的颗粒组成占 90.74%,<0.01 mm 的颗粒组成占 8.43%。所选用的植物为狗牙根 [*Cynodon dactylon* (L.) Persoon],它与砒砂岩区广泛生长的野牛草极为类似,也具有根系较小、叶面窄长、移植成活率高等特点。

### 1.2 试验设计

采用标准小区 5 m×1 m,进行室内模拟降雨试验,主要考察降雨强度、坡度和植被覆盖度的影响。根据全面调查立体条件和气候条件的基础上,砒砂岩区相对稳定坡度多在 30°左右<sup>[10]</sup>。因此,试验中考察砒砂岩的坡度为 20°,30°,40°。根据当地多年降雨数据资料选择降雨强度为 20,50,80 mm/h,植被覆盖率为 10%,30%,50%。此外,在砒砂岩区沟坡系统的陡坡面上很少有植被生长,因此,仅在 20°的缓坡条件下进行植被覆盖度的影响研究。试验设计见表 1,砒砂岩裸地坡面依次编号为 A<sub>1</sub>—A<sub>9</sub>,有植被覆盖坡面依次编号为 B<sub>1</sub>—B<sub>9</sub>。

表 1 试验设计方案

Table 1 Design of experiments

试验 编号	降雨强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	坡度/ (°)	植被 覆盖率/%	试验 编号	降雨强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	坡度/ (°)	植被 覆盖率/%
A <sub>1</sub>	20	20	0	B <sub>1</sub>	20	20	10
A <sub>2</sub>	20	30	0	B <sub>2</sub>	20	20	30
A <sub>3</sub>	20	40	0	B <sub>3</sub>	20	20	50
A <sub>4</sub>	50	20	0	B <sub>4</sub>	50	20	10
A <sub>5</sub>	50	30	0	B <sub>5</sub>	50	20	30
A <sub>6</sub>	50	40	0	B <sub>6</sub>	50	20	50
A <sub>7</sub>	80	20	0	B <sub>7</sub>	80	20	10
A <sub>8</sub>	80	30	0	B <sub>8</sub>	80	20	30
A <sub>9</sub>	80	40	0	B <sub>9</sub>	80	20	50

### 1.3 试验过程与测试方法

模拟降雨试验在黄河水利科学研究院模型黄河降雨试验大厅进行,其中模拟降雨装置采用下喷式的自动模拟降雨系统,其降雨的均匀性可达到 90%以上。试验用的土槽为移动式可变坡度的钢槽,其坡度调节范围为 5°~45°,土槽的长为 5.0 m,宽为 2.0 m,高为 0.6 m,宽度方向上分为 2 个 1.0 m 的土槽。狗牙草则采用试验前一个月的苗子进行移植,并通过对种植时的密度控制及叶面修剪来控制覆盖度大小,从而保证试验中的植被覆盖率要求。

模拟砒砂岩坡面采用控制容重的方法填土,层层

压实,容重均控制在  $1.4 \sim 1.5 \text{ g/cm}^3$ ,使其接近野外实际砒砂岩容重。为便于渗水,填土之前,在坡面底部预先铺上 10 cm 厚的沙子。每场降雨试验的前一天,先用非常小的雨量进行预降雨,在基本保证不产生侵蚀的条件下直至形成产流为止,从而可以有效消除不同工况下的边界差异。同时,在每次降雨前,均需要用塑料薄膜将坡面盖住,并在坡面的 4 个角放置雨量筒,初始降雨 15 min,用于校核降雨强度大小及其均匀性。降雨持续 1 h,降雨过程中每 3 min 接一个产流泥沙样,采用集沙桶收集产流产沙情况,后用烘干法测得产沙量。

#### 1.4 数据分析和建模方法

模拟试验结果利用 SPSS 软件和非线性回归分析方法进行拟合,建立回归方程。

## 2 结果与分析

### 2.1 砒砂岩裸地坡面产沙特征分析

从图 1 中可以看出,不同坡度条件下,降雨初期

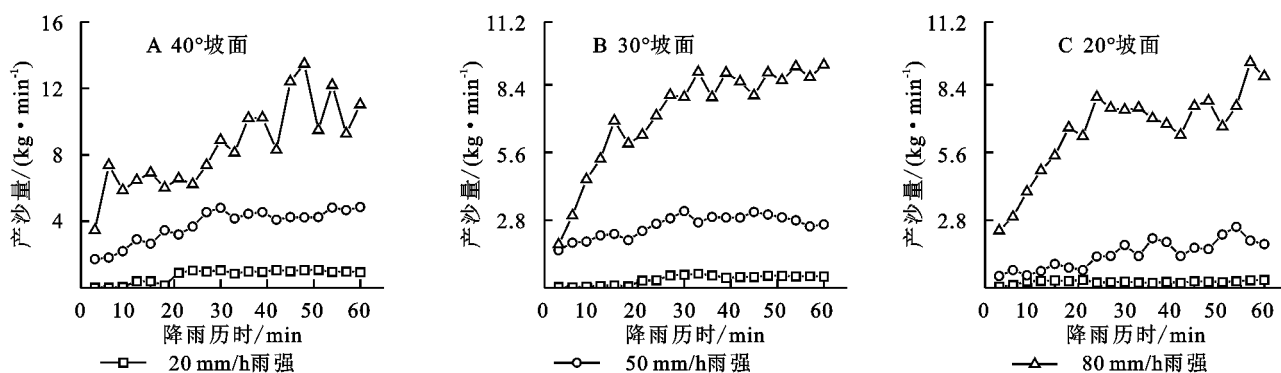


图 1 裸坡坡面产沙量随降雨历时的变化曲线

Fig. 1 Curve of sand yield on the bare slope with the duration of rainfall

### 2.2 砒砂岩植被覆盖坡面产沙特征分析

图 2 为不同降雨强度和植被覆盖度下,砒砂岩坡面产沙量随时间的变化曲线,从图中可以看出,砒砂岩植被覆盖坡面产沙量随时间变化规律同裸露坡面的情况相似,其中初期产沙量随降雨历时的增加而不断增大,之后逐渐趋于稳定。砒砂岩坡面植被减蚀效果也明显受降雨强度影响,不同降雨强度时,植被的减蚀率相差较大。当降雨强度为 20 mm/h 时,不同覆盖度的植被减沙效果均非常明显 ( $p < 0.01$ ),所有植被覆盖度的减沙率均超过 70.00%。但当降雨强度为 80 mm/h 时,只有植被覆盖度为 50% 对应的产沙量与裸坡相比变化明显,减沙率为 86.72%,其他覆盖度条件,产沙量与裸坡相比变化并不明显 ( $p > 0.05$ )。

## 3 讨论

根据模拟降雨试验结果,得到了累计产沙量随降

单位时间的产沙量均随降雨历时的增加不断增加,随后逐渐趋于稳定。其中,降雨强度越小的情况下,单位时间内的产沙量最终趋于稳定的时间越早。而在降雨历时半小时以后,所有工况下的单位侵蚀产沙量基本都趋于稳定。已有研究表明<sup>[13]</sup>,黄土类坡面的侵蚀产沙量随降雨历时的变化曲线会有 3 种形式:平缓型、单峰型和多峰型,而砒砂岩坡面侵蚀产沙量随时间变化均为平缓型。在本次试验研究的时间范围内尚未出现峰值,这其中可能的原因是砒砂岩在遇水后短时间内出现侵蚀溃散,并呈现出侵蚀恶化的趋势,直至达到水流可携带泥沙的极大值。另外,侵蚀产沙量受降雨强度的影响为极其显著 ( $p < 0.01$ ),即为降雨强度越大,砒砂岩坡面形成的产沙量也越大,曲线波动的程度也更加明显。而在试验中的 3 种降雨强度条件下,侵蚀产沙量均随坡度的增加而呈现轻微的增加趋势,但该趋势并不明显 ( $p > 0.05$ ),说明坡度对侵蚀产沙量的影响小于降雨强度的影响<sup>[14]</sup>。

雨时间的关系(图 3),可以看出,不同坡面的累计产沙量随降雨历时增加而增加,且有增加变陡的趋势(曲率增加),这是由于随着时间推移,坡面侵蚀程度增大,径流中所含的泥沙在输移过程中增强了侵蚀动力,加剧了侵蚀产沙,该结果与肖培青等<sup>[15]</sup>得出累计产沙量与降雨历时成幂函数的结论基本一致。

### 3.1 累计产沙量拟合曲线

由图 3 看出,在不同的试验工况下,每分钟产沙量相差很大,导致这些累计产沙与降雨历时的关系曲线偏离也很大,难以统一分析。如果采用幂函数拟合,每一个试验条件都得到一个具有两个参数的公式,得不到统一的对应关系。因此,考虑对累计产沙量进行无量纲的归一化处理,使得数值在  $0 \sim 1$ <sup>[16]</sup>,即为:将累计产沙量值都除以其 1 h 总产沙量,降雨历时以 1 h 的百分数表示。并得到了归一化后的关系曲线(图 4),所有工况条件下得到曲线重合性好。

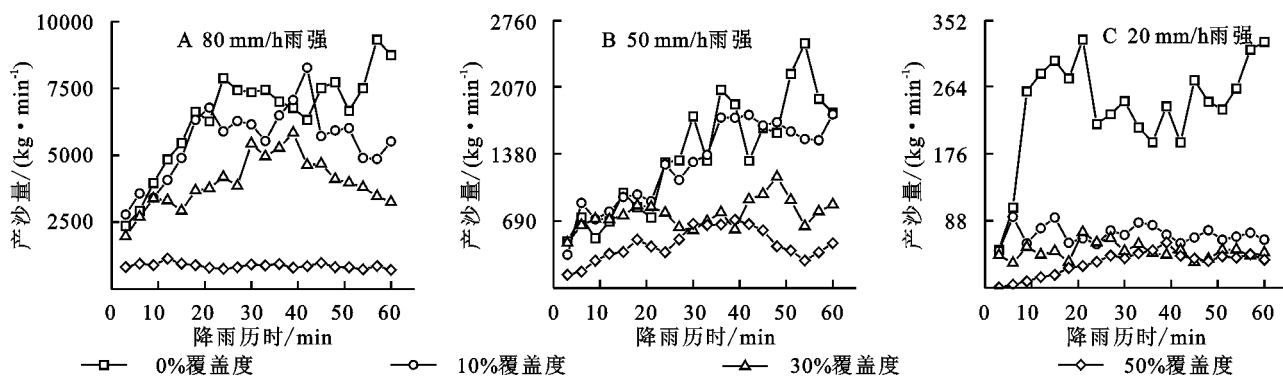


图2 植被覆盖坡面产沙量随降雨历时的变化曲线

Fig. 2 Curve of sediment yield on vegetation cover slope with rainfall duration

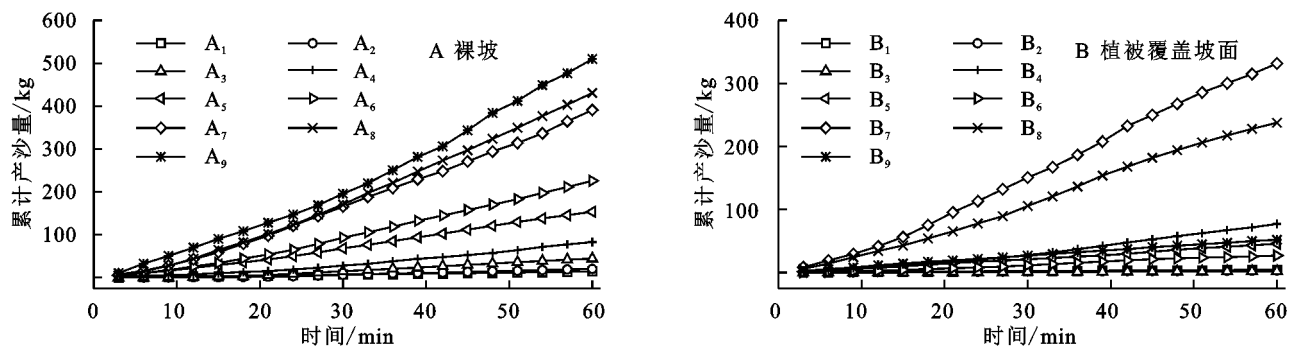


图3 累计产沙量随降雨历时的关系曲线

Fig. 3 Relationship curve of cumulative sediment production with rainfall duration

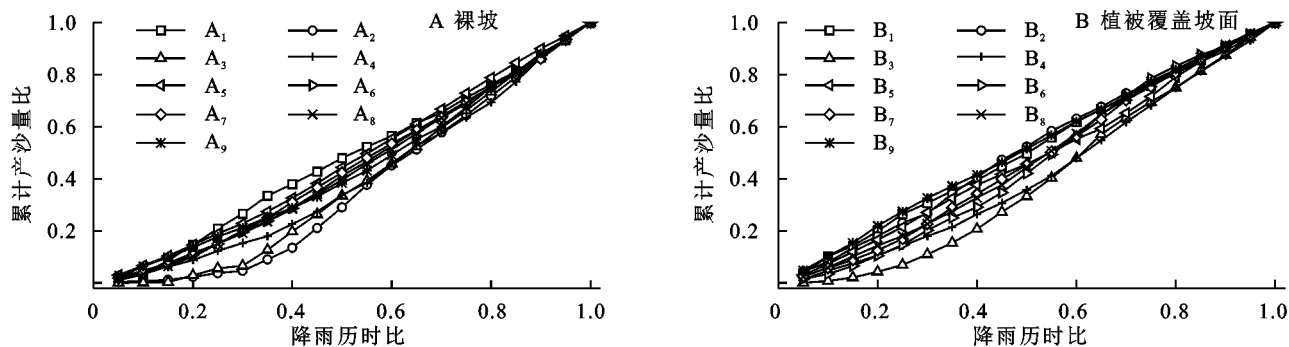


图4 累计产沙量随降雨历时变化的归一化关系曲线

Fig. 4 Normalized relationship curve of cumulative sediment production change with rainfall duration

由图4可以看出,归一化曲线基本都位于 $y=x$ 下方,且非常接近以其为弦的圆弧,因此考虑采用曲线拟合,并假定一条圆弧,圆心设为 $(a,b)$ ,在曲线的左上方,半径为 $r$ ,其中圆弧同时经过点 $(0,0)$ 和 $(1,1)$ ,则该弧线上的点 $(x,y)$ 满足以下关系:

$$\begin{cases} a^2 + b^2 = r^2 \\ (a-1)^2 + (b-1)^2 = r^2 \\ (a-x)^2 + (b-y)^2 = r^2 \end{cases} \quad (1)$$

且有 $a \leq 0, b > 0, b > y$ 。

从而获得目标的拟合方程为:

$$y = 1 - a - \sqrt{(1-a)^2 + 2ax - x^2} \quad (2)$$

对每条归一化后的曲线按照公式(2)进行非线性拟合,得到 $a$ 值和拟合相关系数 $R^2$ (表2),其中相关系

数均在0.95以上,因此拟合的误差较小。而 $B_1, B_2$ 和 $B_3$ 这3个组别中 $a$ 值特别大,说明该3种工况下,圆弧曲率很大,曲线接近于直线,且都属于具有覆盖率的两个边缘情况,说明该拟合曲线存在一定的临界条件。在试验组的基础上,去除该三组数据后,对其他数据进行求平均值,从而保证其统一拟合的效果,从而得到 $a$ 值约为-2.480,方差为3.154,各组数据基本均匀分布在拟合曲线的附近,且符合归一化曲线下凹、斜率逐渐增大的特点,可以较好地反映试验条件下累计产沙量随降雨历时的变化规律,故可以得到砒砂岩坡面侵蚀的累计产沙量与降雨历时 $(t)$ 的拟合曲线方程为:

$$y = 3.48 - \sqrt{3.48^2 - 4.96t - t^2} \quad (3)$$

式中: $t$ 为降雨历时(h),取值范围0~1。



表 2 拟合参数  $a$  值及相关系数

Table 2 Fitting parameter  $a$  values and correlation coefficients

试验编号	拟合 $a$ 值	相关系数( $R^2$ )	样本数( $n$ )	试验编号	拟合 $a$ 值	相关系数( $R^2$ )	样本数( $n$ )
A <sub>1</sub>	-5.371	0.995	20	B <sub>1</sub>	-11759.676	0.999	20
A <sub>2</sub>	-1.057	0.994	20	B <sub>2</sub>	-4394.085	0.996	20
A <sub>3</sub>	-2.294	0.995	20	B <sub>3</sub>	-1.204	0.973	20
A <sub>4</sub>	-0.776	0.964	20	B <sub>4</sub>	-1.497	0.994	20
A <sub>5</sub>	-3.879	0.997	20	B <sub>5</sub>	-5.512	0.999	20
A <sub>6</sub>	-1.920	0.994	20	B <sub>6</sub>	-3.746	0.980	20
A <sub>7</sub>	-0.973	0.972	20	B <sub>7</sub>	-4.970	0.993	20
A <sub>8</sub>	-2.130	0.995	20	B <sub>8</sub>	-5.304	0.991	20
A <sub>9</sub>	-1.820	0.998	20	B <sub>9</sub>	-5811.506	0.997	20

3.2 多元非线性回归分析模型

多元非线性分析是利用数理统计的方法建立多个自变量与一个因变量之间非线性的函数关系,在诸多领域得到广泛应用<sup>[17-19]</sup>。

(1) 传统方法是采用曲线化直线,利用 6 种初等函数对自变量进行变换,然后根据经典的最小二乘法原理,建立预测因变量与变换后自变量的线性关系。这种模型有一定精度,但没有考虑因素间的交互影响。其数学表达式一般为:

$$y = \sum_{i=1}^n a_i f_i(x_i) + k \tag{4}$$

(2) 另一种有效的方法是直接提出非直线形式的期望函数,作为模型框架,采用高斯-牛顿法进行参数估计,反复迭代直至参数估计收敛。该方法的方差分析  $F$  值和  $p$  值的意义不大。其数学表达式一般为:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n, \theta) \tag{5}$$

影响坡面水力侵蚀产沙的因素,主要包括降雨、坡度、土壤特性(含水量、粒径大小、黏粒含量、内摩擦角等)、植被,以及坡长和人为作用等因素<sup>[20]</sup>。试验条件下,降雨强度、坡度和植被覆盖度是影响产沙量的 3 个最主要因素。大量的研究表明,侵蚀产沙量与降雨强度间存在幂函数关系<sup>[21-22]</sup>,并在该研究中得到了验证。对于具有临界坡度的情况下,在临界坡度之前,与坡度间可能存在二次函数关系<sup>[23]</sup>;而与植被覆盖度间的关系比较复杂,尚未明确,为方便之后建模,暂定为线性关系。预测模型的因变量为总侵蚀产沙量  $Y$ (单位 kg),自变量分别为:降雨强度  $I$ (为方便计算,单位选择 mm/min);坡面坡度数值  $S$ ;植被覆盖度的百分数  $C$ 。

采用第一种方法(单因素分析,表明  $Y$  与  $I^{2.5}$  呈线性关系),可得到回归函数如下:

$$Y = aI^{2.5} + bS + cC + d = 156.6I^{2.5} + 4.64S - 2.6C - 73.3 \tag{6}$$

其相关系数  $R^2 = 0.839$ ,拟合效果一般,且各参

数的标准误差均很大,用作回归模型不太理想。

采用第二种方法,需预先确定期望函数。根据前面对不同条件下产沙量变化过程的分析,降雨强度是主因,且自变量中降雨强度同坡度、植被覆盖度间存在较强的响应关系,建立回归函数如下:

$$Y = I^a (bS + cC + d) + e = I^{2.25} (3.62S - 3.21C + 129.21) - 4.72 \tag{7}$$

其相关系数  $R^2 = 0.980$ ,模型拟合效果很好。

研究发现公式(7)中的常数项同总产沙量的实测值比较,可以忽略,因此考虑修改期望函数,重新建立回归函数,其表达式如下:

$$Y = I^a (bS + cC + d) = I^{2.32} (3.54S - 3.16C + 124.9) \tag{8}$$

其相关系数仍为  $R^2 = 0.980$ ,但形式更为简单。

式中: $Y$  为试验小区砒砂岩坡面的侵蚀产沙量(kg); $I$  为降雨强度(mm/min); $S$  为坡度值,取值范围  $10^\circ \sim 40^\circ$ ;  $C$  为植被覆盖度的百分数,取值范围  $0 \sim 50\%$ ;  $a, b, c, d, e$  为模型拟合参数。

表 2 是试验的实测值和公式(8)估计值的比较(图 5)。从图 5 可以看到,即使侵蚀产沙量波动范围为  $4.20 \sim 509.78$  kg,估测值与实际值的误差大部分都在 10% 以内,说明公式(8)的估计效果依然很好,且形式简单,能很好地反映变量间关系。

3.3 砒砂岩坡面侵蚀产沙量估测模型

通过对不同条件下砒砂岩坡面侵蚀的累计产沙量变化规律和总产沙量的数值模拟结果与分析,得到了试验小区条件下,侵蚀产沙量与降雨强度、坡度、植被覆盖度和降雨历时的相互关系,形成了如下估测模型,如公式(9)所示。

$$Y = I^{2.32} (3.54S - 3.16C + 124.9) (3.48 - \sqrt{3.48^2 - 4.96t - t^2}) \tag{9}$$

式中: $Y$  为试验小区砒砂岩坡面的侵蚀产沙量(kg);

$I$  为降雨强度 ( $\text{mm}/\text{min}$ );  $S$  为坡度值, 取值范围  $10^\circ \sim 40^\circ$ ;  $C$  为植被覆盖度的百分数, 取值范围  $0 \sim 50\%$ ;  $t$  为降雨历时 ( $\text{h}$ ), 取值范围  $0 \sim 1$ 。研究表明, 坡面侵蚀产沙量的确与降雨强度间呈幂函数关系, 而与坡度和植被覆盖度在一定范围内呈线性关系, 且随降雨历时符合弧线式增长。

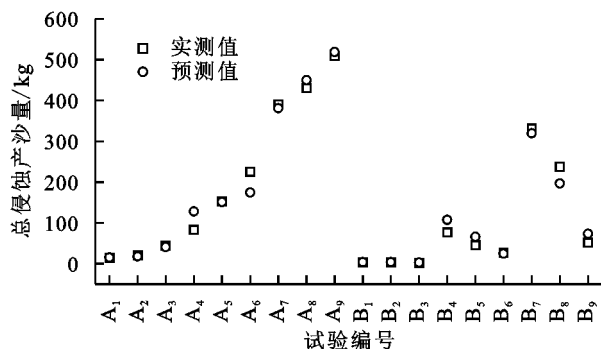


图5 总侵蚀产沙量值和估测值对比

Fig. 5 Comparison of total erosion sand production value and estimates

## 4 结论

(1) 砒砂岩坡面产沙量受降雨强度的影响最为明显, 受坡度的影响相对较弱。不同条件下, 产沙量随降雨历时的变化曲线均为平缓型, 初期产沙量随降雨历时的增加而不断增加, 之后趋于稳定。

(2) 植被的减蚀效果受降雨强度的影响很大, 小降雨强度时, 植被减蚀效果明显, 然而随着降雨强度的增加, 低植被覆盖度的效果越来越差, 当降雨强度达到  $80 \text{ mm}/\text{h}$  时, 只有覆盖度为  $50\%$  时, 植被减沙效果明显。

(3) 建立了砒砂岩坡面侵蚀产沙量的多元非线性回归模型。模型结果表明, 产沙量同降雨强度呈幂函数关系, 而同坡度和植被覆盖度在一定范围内呈线性关系, 随降雨历时呈现很好的弧线式增长。然而, 该模型目前对标准小区的特定条件下的拟合程度和适用性效果较好, 针对野外侵蚀估测还需要更多的数据和模型修正, 从而可以得到更加精确的预测模型。

### 参考文献 (References):

[1] 王愿昌, 吴永红, 寇权, 等. 砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 14-18.  
Wang Y C, Wu Y H, Kou Q, et al. Definition of arsenic rock zone borderline and its classification[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(1): 14-18.

[2] 秦富仓, 杨振奇, 李龙. 砒砂岩区土壤侵蚀机理与生态修复技术研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(12): 142-150.

Qin F C, Yang Z Q, Li L. Research progress on soil erosion mechanism and ecological restoration technology in feldspathic sandstone region[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(12): 142-150.

[3] Liang Z S, Wu Z R, Yao W Y, et al. Pisha sandstone: Causes, processes and erosion options for its control and prospects[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2019, 7(1): 1-8.

[4] 姚文艺, 肖培青, 王愿昌, 等. 砒砂岩区侵蚀治理技术研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(5): 1-9, 15.  
Yao W Y, Xiao P Q, Wang Y C, et al. Research progress on soil erosion control technologies in Pisha sandstone areas[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(5): 1-9, 15.

[5] 苏涛, 张兴昌. 砒砂岩陡坡面径流水动力学特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 17-21.  
Su T, Zhang X C. Hydraulic characteristics of steep slope runoff of pisha sandstone[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(1): 17-21.

[6] 苏涛, 张兴昌, 王仁君, 等. 植被覆盖对砒砂岩地区边坡侵蚀的减流减沙效益[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 98-101, 255.  
Su T, Zhang X C, Wang R J, et al. Effect of vegetation coverage on slope runoff and sediment reduction in Pisha sandstone region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(3): 98-101, 255.

[7] 杨吉山, 姚文艺, 郑明国, 等. 原状砒砂岩坡面产流产沙规律试验研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(1): 98-101, 109.  
Yang J S, Yao W Y, Zheng M G, et al. Experimental study on runoff production and sediment yield process on the undisturbed sandstone slopes[J]. Yellow River, 2017, 39(1): 98-101, 109.

[8] Liang Z S, Liu H W, Zhao Y B, et al. Effects of rainfall intensity, slope angle, and vegetation coverage on the erosion characteristics of Pisha sandstone slopes under simulated rainfall conditions[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(15): 17458-17467.

[9] 杨振奇, 郭建英, 秦富仓, 等. 裸露砒砂岩区降雨条件下坡面微地形变化规律[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 111-118.  
Yang Z Q, Guo J Y, Qin F C, et al. Change law of slope micro-topography under rainfall condition in exposed feldspathic sandstone region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 111-118.

[10] 李龙, 张鹏, 郭跃, 等. 自然降雨条件下砒砂岩坡面细沟微形态及其侵蚀特征[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 15-22.  
Li L, Zhang P, Guo Y, et al. Micromorphology and erosion

- characteristics of rills on feldspathic sandstone slopes under natural rainfall conditions[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 15-22.
- [11] 董晓宇, 秦富仓, 李龙, 等. 裸露砒砂岩区坡面侵蚀过程中地表粗糙度与水力侵蚀特征参数的关系[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 33-41.
- Dong X Y, Qin F C, Li L, et al. Relationship between surface roughness and hydraulic erosion characteristic parameters during slope erosion in exposed Pisha sandstone area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 33-41.
- [12] 叶俊道, 秦富仓, 岳永杰, 等. WEPP 模型在砒砂岩地区土壤侵蚀模拟的适用性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(7): 132-135.
- Ye J D, Qin F C, Yue Y J, et al. The applicability of WEPP in simulating the soil erosion in soft rock region [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(7): 132-135.
- [13] 李宏伟, 王文龙, 王贞, 等. 神东煤田原地面侵蚀产沙规律野外降雨试验[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(2): 195-201.
- Li H W, Wang W L, Wang Z, et al. Effect of simulated rainfall experiments on soil erosion and sediment yield of the undisturbed lands in Shendong Coalfield [J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(2): 195-201.
- [14] 王其东, 高海鹰, 梁止水, 等. 新型亲水性聚氨酯对砒砂岩边坡抗降雨侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 29-32, 114.
- Wang Q D, Gao H Y, Liang Z S, et al. Effect of a novel hydrophilic polyurethane on increasing pisha sandstone resistance to rainfall erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(3): 29-32, 114.
- [15] 肖培青, 姚文艺, 申震洲, 等. 苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J]. 水利学报, 2011, 42(2): 232-237.
- Xiao P Q, Yao W Y, Shen Z Z, et al. Experimental study on erosion process and hydrodynamics mechanism of alfalfa grassland [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(2): 232-237.
- [16] 侯建才, 李占斌, 崔灵周, 等. 黄土高原典型流域次降雨径流侵蚀产沙规律研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(2): 210-214, 221.
- Hou J C, Li Z B, Cui L Z, et al. Research on runoff erosion and sediment yield laws of typical watershed under single rainfall on Loess Plateau[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2008, 36(2): 210-214, 221.
- [17] 乔荣荣, 季树新, 白雪莲, 等. 流域沟壑数量特征与侵蚀量关系[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2020, 18(6): 9-14.
- Qiao R R, Ji S X, Bai X L, et al. Relationship between gully quantitative characteristics and soil erosion amount[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(6): 9-14.
- [18] 高翔, 蔡雄飞, 王济, 等. 喀斯特小流域分布式土壤侵蚀估算模型[J]. 山地学报, 2013, 31(5): 542-547.
- Gao X, Cai X F, Wang J, et al. Distributed soil erosion estimation model for small watershed in Karst area[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 31(5): 542-547.
- [19] 覃超, 何超, 郑粉莉, 等. 黄土坡面细沟沟头溯源侵蚀的量化研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 160-167.
- Qin C, He C, Zheng F L, et al. Quantitative research of rill head advancing process on loessial hillslope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(6): 160-167.
- [20] 姚文艺, 汤立群. 水力侵蚀产沙过程及模拟[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2001.
- Yao W Y, Tang L Q. Hydraulic Erosion of Sand Production Process and Simulation [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Publishing House, 2001.
- [21] 管新建. 不同土质坡面水蚀过程模拟试验及建模研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- Guan X J. Study on Experimental Simulation and Modeling of Slope Erosion Process of Different Soils[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.
- [22] 郭建英, 董智, 李锦荣, 等. 放牧强度对荒漠草原土壤物理性质及其侵蚀产沙的影响[J]. 中国草地学报, 2019, 41(3): 74-82.
- Guo J Y, Dong Z, Li J R, et al. Effects of grazing intensity on soil physical properties and soil erosion and sediment yield in desert steppe [J]. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(3): 74-82.
- [23] 苏远逸, 李鹏, 任宗萍, 等. 坡度对黄土坡面产流产沙过程及水沙关系的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(2): 118-122.
- Su Y Y, Li P, Ren Z P, et al. Effect of slope gradient on the process of runoff and sediment yield and water-sediment relation on the loess slope[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(2): 118-122.