

# 王家沟流域水土保持特点与土壤侵蚀经验模型的构建

王小云, 聂兴山

(山西省水土保持科学研究所, 太原 030013)

**摘要:**以王家沟流域 60 a 的水土保持措施实施资料和土壤流失量为资料, 分析了该流域多年的水土保持治理措施特点并构建了该流域的土壤侵蚀经验模型。研究表明王家沟流域的水土流失治理分为 1955—1957 年的坡面治理阶段, 1957—1995 年的坡面和沟道综合治理阶段, 以及 1995—2005 年的管护阶段。治理效果分为三个阶段, 即 1955—1970 年的初期阶段, 1970—1990 年的中期阶段和 1990—2005 年的后期阶段。分析表明水土流失治理度可以代表水土保持措施 93.36% 的信息量, 并构建和验证了该流域土壤侵蚀的经验模型  $A = K - \alpha C_R + \beta R_E$ 。

**关键词:**土壤侵蚀; 经验模型; 水土流失治理度; 降雨侵蚀力

**中图分类号:** S157.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2015)02-0022-04

## Characteristics of Soil and Water Conservation and Empirical Model Construction of Wangjiagou Watershed

WANG Xiaoyun, NIE Xingshan

(Shanxi Institute of Soil and Water Conservation, Taiyuan 030013, China)

**Abstract:** In order to systematically understand the characteristics of soil and water conservation, and to construct empirical model of soil erosion of Wangjiagou watershed, five decades database of soil and water conservation data was analyzed. Analysis indicated that this watershed had experienced three soil and water conservation stages. From 1955 to 1957, the watershed was at hillside control stage, hillside and gully control stage from 1957 to 1995, and management and control stage from 1995 to 2005. Soil and water conservation efficacy was characterized as three phases, the first one was primary phase from 1955 to 1970, the second one was middle phase from 1970 to 1990, the last one was the senior phase from 1990 to 2005. Analysis also indicated that soil and water conservation ratio could represent 93.36% of the information on soil and water conservation measures. The soil erosion empirical model was constructed as the equation ( $A = K - \alpha C_R + \beta R_E$ ) with variables of soil-water conservation ration ( $C_R$ ) and rainfall erosivity ( $R_E$ ).

**Keywords:** soil erosion; empirical model; soil and water conservation ratio; rainfall erosivity

土壤侵蚀模型的研发和应用是促进土壤侵蚀和水土保持科研定量化<sup>[1]</sup>、预报水土流失、指导水土保持措施配置、优化水土资源利用的有效工具<sup>[2]</sup>。用土壤侵蚀模型来预测和估算土壤流失, 模型的适用范围对预测的可行性和准确性具有重要影响。目前主要有坡面尺度、流域尺度和区域尺度三种尺度的土壤侵蚀模型<sup>[3]</sup>。水土保持工作通常在流域尺度内实施, 因此该尺度内的土壤侵蚀模型对土壤侵蚀的预测、水土保持措施的实施和治理效果的评估具有重要影响。目前流域土壤侵蚀模型主要有 SWAT 模型<sup>[4]</sup>, EU-ROSEM 模型<sup>[5]</sup>, LISEM 模型<sup>[6]</sup>, 我国所建立的黄土高原小流域土壤侵蚀预报模型等<sup>[7-9]</sup>多种物理和经验

模型。为了使土壤侵蚀模型的应用大众化和平民化, 本文通过对山西省王家沟流域 50 多年的水土保持治理和土壤流失量资料进行分析来构建简易的土壤侵蚀经验模型, 增强基层非专业人员或农业工作者对土壤侵蚀的理解, 使得土壤侵蚀的原理和水土保持的技术能在基层得以推广和发挥。

## 1 研究区概况与资料收集

### 1.1 研究区概况

王家沟流域地处吕梁市离石区城北 4 km 处, 位于东经 110°09', 北纬 37°33', 是三川河流域北川河支流的一条支沟, 流域总面积 9.1 km<sup>2</sup>, 海拔高程 950~

1 320 m, 相对高差 370 m。该流域属典型暖温带大陆性季风气候, 年平均降水量为 506.5 mm, 年平均气温 9℃, 年平均日照时数 2 592 h, 无霜期 160~200 d, 年平均风速 1.3 m/s。

王家沟流域有耕地面积 373.3 hm<sup>2</sup>, 占流域总面积的 41%, 其中梁峁坡和沟坡分别占耕地总面积的 36.59% 和 50.59%。该流域是山西省水土保持科学研究所的科研基地, 经过 50 多年的综合治理, 土壤侵蚀得到了显著控制, 有效提高了当地的社会、生态和经济发展, 同时形成了一套科学合理的黄土高原水土流失治理体系。

## 1.2 资料收集

20 世纪 50 年代起, 山西省水土保持科学研究所开始对王家沟流域进行治理, 经过 50 多年的治理、管理和考察, 获得了一系列丰富而详实的科研数据。本文收集了王家沟流域多年的水平梯田、淤地坝、造林、种草和泥沙流失量等资料, 在整理和筛选的基础上进行了组成成分分析、回归分析、模型验证等一系列科学分析。

# 2 结果与分析

## 2.1 王家沟流域主要水土保持措施

水土保持治理措施主要有生物措施、工程措施和耕作措施三大类<sup>[10]</sup>。从水土保持措施的实施和配置来看, 王家沟流域水土保持的治理有三个阶段, 1955—1957 年的坡面治理阶段, 主要以林草措施治理为主; 1957—1995 年的坡面和沟道综合治理阶段, 有生物和工程两大措施, 主要以淤地坝建设、水平梯田修建、造林和种草为主; 1995—2005 年为管护与效益发挥阶段, 此阶段没有布置和实施大规模的水土保持措施, 主要以管护、监测和评估为主。王家沟流域各项措施治理成果见图 1。

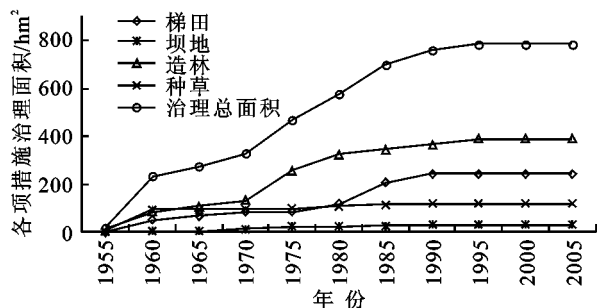


图1 王家沟流域水土保持各项措施累计治理面积

由图1可知, 王家沟流域从1970年后造林面积增长较快, 由1970年的 133 hm<sup>2</sup> 增长到1995年的 390.84 hm<sup>2</sup>。种草面积主要集中在1955—1960年, 1955年为 6.2 hm<sup>2</sup>, 1958年增长到 46.67 hm<sup>2</sup>, 1960年增长到 93.33 hm<sup>2</sup>, 1960年后增长相对较少。水平

梯田的增长主要集中在1955—1970年和1971—1995年两个阶段。第一个阶段从1955年的 0 hm<sup>2</sup> 增长到1970年的 86.67 hm<sup>2</sup>, 第二个阶段从1970年 86.67 hm<sup>2</sup> 增长到1995年的 245.23 hm<sup>2</sup>。1980年后增长较快, 由1980年的 120.00 hm<sup>2</sup> 增长到1990年的 244.94 hm<sup>2</sup>。

淤地坝在1965—1975年间淤地面积较多, 从 4.27 hm<sup>2</sup> 增长到 22.01 hm<sup>2</sup>。1975—1990年增长相对缓慢, 由 22.01 hm<sup>2</sup> 增长到 30.46 hm<sup>2</sup>, 1990—2005年间淤地面积基本没有变化。由淤地坝的淤地面积增长可知, 1975年前该流域水土流失较多, 淤地面积增长较快, 而1975年之后, 水土保持措施效果得到了发挥, 水土流失量有所下降, 淤地面积增长较慢。1990年之后水土流失量基本得到了控制, 淤地面积基本没有增长。由淤地坝面积增长可知王家沟流域的水土保持效果可分为三个阶段, 即1955—1970年的初级阶段, 1970—1990年的中级阶段和1990年至今的高级阶段。

王家沟流域总面积 910 hm<sup>2</sup>, 其中梁峁顶、梁峁坡和沟坡总面积为 869.93 hm<sup>2</sup>。王家沟流域在治理中多种水土保持措施相互搭配, 同步实施。其中梁峁顶、梁峁坡和沟坡治理措施为梯田、造林和种草, 沟道主要以修建淤地坝、拦截泥沙, 淤沟造地为主。

由图2可知, 从1955—2005年, 王家沟流域的水土保持措施主要以造林和修建水平梯田为主, 这两种措施的总治理面积达到 636.07 hm<sup>2</sup>, 占总流域面积的 69.89%, 占坡面总面积的 73.12%。王家沟流域梁峁坡和沟坡等坡面不同时段累积治理面积见图2。

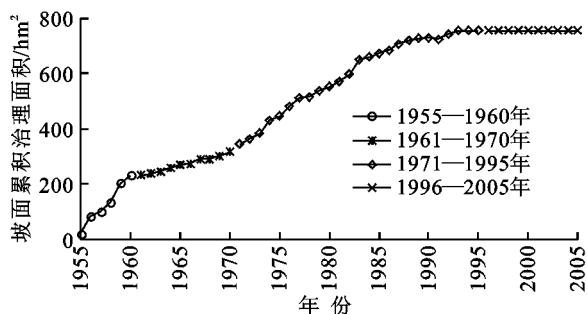


图2 王家沟流域不同阶段水土保持措施累计治理面积

由图2可知, 至1960年坡面累积治理面积 231.00 hm<sup>2</sup>, 坡面治理度为 27%; 至1970年坡面累积治理面积 317.25 hm<sup>2</sup>, 坡面治理度为 36.46%; 至1995年坡面累积治理面积达到 755.53 hm<sup>2</sup>, 坡面治理度为 86.73%; 1996—2005年治理治理面积没有发生变化。

## 2.2 水土保持措施的表达

水土流失治理度是指在基准面积内, 水土流失治理面积占基准面积的比例, 是水土保持治理效果最直接的表达, 它能直观反映流域内水土流失治理的范

围、强度、覆盖面等信息,但能多大程度地代表水土流失各项措施的综合治理信息,还需要进一步的分析和讨论。针对单项水土保持措施减沙的研究较多<sup>[11-12]</sup>,但关于水土流失治理度与流域土壤侵蚀量的研究较少<sup>[13]</sup>。由于产流和产沙与流域内坡面土地面积和坡度等因子密切相关,因此坡面治理对土壤侵蚀的控制与治理效果比较显著<sup>[14]</sup>。基于王家沟流域多年来水土保持措施主要以坡面和沟道治理为主,因此以该流域各主要防治措施的治理面积和综合治理度进行主成分分析,得出综合治理度与沟道和坡面治理措施的相关系数。主成分分析的相关系数、规格化特征向量和主成分分析的特征值结果见表 1、表 2 和表 3。

表 1 为主成分分析各因子间的相关系数。由表 1 可知,治理度与梯田治理面积、坝地治理面积、造林面积和种草面积的相关系数在 0.84~0.98 之间,具有极显著相关性。

表 1 水土保持措施因子主成分分析相关系数

相关系数	治理度	梯田	坝地	造林	种草
治理度	1.00	0.98	0.98	0.99	0.84
梯田	0.98	1.00	0.93	0.94	0.80
坝地	0.98	0.93	1.00	0.99	0.80
造林	0.99	0.94	0.99	1.00	0.80
种草	0.84	0.80	0.80	0.80	1.00

表 2 为水土保持措施因子的特征向量表。由表中第一特征向量可知,治理度的特征向量最大,梯田其次,而坝地和造林面积的相近,种草面积的最小。

表 2 规格化特征向量

规格化特征向量	治理度	梯田	坝地	造林	种草
治理度	0.4638	-0.1236	0.0836	-0.2429	-0.8388
造林	0.4574	-0.2559	-0.3281	-0.6475	0.4454
坝地	0.4545	-0.2526	-0.4929	0.6966	0.0377
梯田	0.4497	-0.1810	0.7993	0.1904	0.2998
种草	0.4086	0.9070	-0.0590	0.0162	0.0817

表 3 为水土保持措施因子主成分分析特征值表,由表 3 可知只有水土保持综合治理度的特征值大于 1,因此为第一个主成分,且方差贡献率达到了 93.36%,因此第一主成分综合治理度可以表达王家沟流域水土保持治理的状态和水平。结合表 2 特征向量表可知,第二因子为造林和修建淤地坝的面积,第三因子为修建水平梯田的面积,第四因子为种草面积。

表 3 水土保持措施因子主成分分析特征值

编号	特征值	百分率/%	累计百分率/%
1	4.62	93.36	93.36
2	0.28	5.54	97.99
3	0.09	1.75	99.75
4	0.01	0.25	100.00

## 2.3 流域土壤侵蚀经验模型的构建

土壤侵蚀模型的构建对流域内土壤侵蚀量的评估与预测以及水土保持措施的布置具有重要的指导意义。通过对王家沟流域水土保持多种治理措施进行主成分分析得知,王家沟流域的多种治理措施可以通过水土流失综合治理度这一个因子来代表。因此 50 年来王家沟流域实施的梯田、淤地坝、植树和种草等措施可以用不同时间的水土流失综合治理度来代表,其所代表的总信息量为 93.36%。

根据土壤侵蚀通用方程: $A=R \cdot K \cdot S \cdot L \cdot C \cdot P$  可知土壤侵蚀因素分为外因和内因,外因即土壤侵蚀的外营力,在王家沟流域主要体现为降雨侵蚀力;内因为土壤的地面状况,其中包括由土壤质地、结构等构成的土壤抗蚀力,地面坡度、坡长以及水土保持措施等因子。通用土壤流失方程一般适用于坡面的土壤侵蚀规律研究,在流域范围内则存在一些不足。基于此,本文以土壤侵蚀的内在机理为主线,通过王家沟流域多年的资料来构建流域范围的土壤流失经验模型。

通过多王家沟流域 50 年的土壤侵蚀量、水土流失治理度和降雨侵蚀力进行多元回归分析可构建王家沟流域土壤侵蚀的经验模型。

$$A=23.13-0.36C_R+0.084R_E, R_2=0.86 \quad (1)$$

式中: $A$ ——土壤侵蚀量 $[\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ ;  $C_R$ ——水土流失治理度(%);  $R_E$ ——降雨侵蚀力 $[(\text{J} \cdot \text{mm})/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$ 。

分析模型(1)可知,水土流失治理度与土壤侵蚀量为负相关,这与水土保持减沙效益与水土流失治理度成正相关相一致<sup>[15]</sup>。王家沟流域土壤侵蚀模型可简化为一元二次方程:

$$A=K-\alpha C_R+\beta \quad (2)$$

式中: $K$ ——允许土壤流失量 $[\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ ;  $C_R$ ——流域的水土保持治理状况(%);  $R_E$ ——土壤侵蚀的外营力—降雨侵蚀力 $[(\text{J} \cdot \text{mm})/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$ ;  $\alpha, \beta$ ——系数,其中  $\beta$  为某段降雨单位面积上每毫米降雨产生的动能导致的土壤流失量 $[(\text{m}^2 \cdot \text{t})/(\text{J} \cdot \text{mm})]$ 。

## 2.4 经验模型的检验

对王家沟流域土壤侵蚀经验模型采用拟合优度检验、方程显著性检验以及变量显著性检验。检验结果见表 4 和表 5。表 4 为综合分析表、表 5 为回归方程检验的系数表。表 4 中  $R^2$  为方程的拟合优度检验值,由表可知修正后的  $R^2$  为 0.73,这表明降雨侵蚀力和水土流失治理度的变动代表土壤侵蚀模数 73% 的变动。由表 4 中  $F$  值和  $F$  值的显著性概率可知,该方程的检验呈极显著,可以科学地表达王家沟流域土壤侵蚀量与降雨侵蚀力和水土流失治理度的关系。

表 4 综合分析结果

模型	R	R <sup>2</sup>	预测值标准差	变化统计量			Durbin-Watson 线性检验值
				R <sup>2</sup>	F 值	F 值的显著性概率	
1	0.86a	0.73	10.64	0.73	65.52	0.00	1.03

表 5 显著性检验系数表

模型	非标准化 系 B	标准化系数		T 值	显著 水平	偏相关 系数	共线性统计	
		标准差	$\beta$				容忍度	方差膨胀因子
常数	23.13	7.31		3.16	0.003	-0.35		
治理度	-0.36	0.078	-0.48	-4.68	0.000	0.32	0.52	1.91
降雨侵蚀力	0.084	0.019	0.45	4.33	0.000	0.53	0.52	1.91

从表 5 中  $T$  值以及显著性水平可知,该模型变量因子水土流失治理度和降雨侵蚀力对因变量土壤侵蚀模数的解释呈极显著性。因此该模型中每个解释变量对被解释变量的影响都是显著的,不需要剔除,重新建立方程。

由表 5 中共线性统计因子可知,容忍度为 0.52 远远大于 0.1,方差膨胀因子为 1.91,小于 5,因此可以认为该模型中自变量因子水土流失治理度和降雨侵蚀力之间不具有共线性。

由以上分析可知,王家沟流域土壤侵蚀的经验模型可在一定范围内表达水力侵蚀以及地面主要影响因素,而且关系显著。因此该经验模型可在以坡面和沟道治理为主的小流域范围内进行验证和推广应用,使得土壤侵蚀模型能更加直观简洁地应用于农业生产和生态文明建设的具体工作中。

3 结 论

1) 王家沟流域水土流失治理以梁峁坡和沟坡治理为重点,治理措施以造林和水平梯田修建为主,种草和修建淤地坝为辅。该流域的水土保持治理效果从 1955—1970 年为初级阶段,1970—1990 年尾中级阶段,1990—2005 年为高级阶段。

2) 该流域水土流失总治理度与各项措施间具有极显著相关性,而且可以有效代表水土保持措施的信息,信息表达量达到了 93.36%。治理过程中虽然主要以造林和水平梯田修建为主,但淤地坝建设发挥的作用同等重要。

3) 王家沟流域的土壤侵蚀规律可以用水土流失治理度和降雨侵蚀力所代表的二元一次方程来描述,方程的检验结果较为显著,不存在共线性。

参考文献:

[1] 周正朝,上官周平. 土壤侵蚀模型研究综述[J]. 中国水土保持科学,2004,2(1):52-55.  
[2] 张光辉. 土壤侵蚀模型研究现状与展望[J]. 水科学进

展,2002,13(3):389-396.  
[3] 李辉,陈晓玲. 不同空间尺度下的土壤侵蚀模型研究进展[J]. 华中师范大学学报:自然科学版,2007,40(4):621-624.  
[4] Rostamian R, Jaleh A, Afyuni M, et al. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran[J]. Hydrological Sciences Journal,2008,53(5):977-988.  
[5] Veihe A, Rey J, Quinton J N, et al. Modelling of event-based soil erosion in Costa Rica, Nicaragua and Mexico: evaluation of the EUROSEM model[J]. Catena,2001,44(3):187-203.  
[6] Hessel R, Jetten V, Liu B, et al. Calibration of the LISEM model for a small Loess Plateau catchment[J]. Catena,2003,54(1):235-254.  
[7] 王彬,郑粉莉,Roemkens M J M. 水蚀过程的土壤可蚀性研究述评[J]. 水土保持研究,2013,20(1):277-286.  
[8] 杨勤科,郭明航,李智广,等. 全国土壤侵蚀地形因子提取与初步分析[J]. 中国水土保持,2013(10):17-21.  
[9] 袁殷,王占礼,刘俊娥,等. 黄土坡面细沟径流输沙过程试验研究[J]. 水土保持学报,2010,24(5):88-91.  
[10] 刘宝元,刘瑛娜,张科利,等. 中国水土保持措施分类[J]. 水土保持学报,2013,27(2):80-84.  
[11] 王飞,李锐,穆兴民,等. 渭河流域水利水保措施减沙水代价分异特征与水沙调节模拟[J]. 中国水土保持科学,2004,2(2):12-17.  
[12] 朱金兆,胡建忠. 黄河中游地区侵蚀产沙规律及水保措施减洪减沙效益研究综述[J]. 中国水土保持科学,2004,2(3):41-48.  
[13] 冉大川,刘斌,王宏,等. 黄河中游典型支流水土保持措施减洪减沙作用研究[M]. 南京:黄河水利出版社,2006.  
[14] 汤洁,张爱丽,侯克怡,等. 辽河重污染支流招苏台河径流和泥沙模拟研究[J]. 水土保持研究,2014,21(2):111-115.  
[15] 冉大川,刘斌,白志刚,等. 河龙区间减沙效益与水土流失治理度的关系[J]. 中国水土保持科学,2007,5(2):24-28.