

# 平凉纸坊沟流域水土流失影响因素及其相关关系分析

毛泽秦<sup>1</sup>, 王进鑫<sup>2</sup>

(1. 平凉市水土保持科学研究所, 甘肃 平凉 744000; 2. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**为了深入探讨黄土高原沟壑地区小流域水沙运动及水土流失规律,采用平凉市纸坊沟流域 50 a 的降水、径流、泥沙观测资料和成果,建立数据库,采取数理统计、矩阵计算、分段对比、相关分析等方法对黄土高原沟壑区典型小流域纸坊沟流域的水沙特性及水土流失特点进行了分析,研究了流域降水、径流、泥沙基本特性及其变化规律和水土流失主要影响因素及其相互关系,建立了流域土壤侵蚀流失量与主要影响因素间的单因子数学模型,为同类地区小流域水土流失状况分析和径流、泥沙及水土流失量估算分析确立了简便方式。该文从其研究成果中提炼出了纸坊沟流域水土流失主要影响因子及其变化对土壤侵蚀流失量减少的影响程度以及土壤侵蚀流失量与主要影响因素间的单因子数学模型。

**关键词:**水土流失; 影响因素; 数学模型; 相关关系

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2011)01-0101-04

## Analysis of Affected Factors on Soil Loss and Related Relations in Zhifang Gully Watershed

MAO Ze-qin<sup>1</sup>, WANG Jin-xin<sup>2</sup>

(1. Pingliang Scientific Research Institute of Soil and Water Conservation, Pingliang, Gansu 744000, China; 2. Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Taking the Zhifang gully small watershed as an example, this paper is to further deeply study the basic regulations and characteristics on runoff and silt in some small watersheds in Loess plateau area on the basis of observed data of 50 years of precipitation, runoff and silt as well as research achievement, by ways of d-base establishment, analysis, calculation, partly comparing and related analysis. Through the analysis, we studied the basic characteristics and change regulation and their relationships between precipitation, runoff and silt, meanwhile, we established a single factor mathematic model between quantity of soil loss and its affected factors, which can be used as simple evaluation to analyze runoff and silt and quantity of soil loss in similar areas. This paper gives the affected degree of soil loss reduction by main affected factors and their changes as well as the single factor mathematic mode between quantity of soil loss and its main affected factors.

**Key words:** soil loss; main affected factors; mathematical model; relationship

水土流失是人类社会的重大自然灾害,是造成土壤贫瘠和社会经济反复贫困的主要因素之一。探讨研究水土流失的基本规律和治理措施与途径,科学有效地遏制水土流失,是水土保持和生态环境保护领域的重大课题和任务。我们利用地处西北黄土高原沟壑区的典型小流域平凉市纸坊沟流域连续 50 a 的降水、径流、泥沙观测资料和成果,分析研究小流域的水沙特性及其变化趋势、水土流失特点及主要影响因素以及相关关系等,以为深刻认识全球气候不断变暖和流域治理力度不断加大情况下黄土高原沟壑区小流域水

沙特性及其变化趋势、水土流失特点与主要影响因素及影响程度等,进一步认识小流域水土流失的机理和规律,深化小流域水土流失分析研究的理论基础,提高水土流失治理的针对性和科学性,扎实有效地开展水土保持规划设计实施等提供一些参考依据。这里主要介绍纸坊沟流域水土流失的主要影响因素及其影响程度以及相互关系分析的研究情况及研究结果。

### 1 研究区域概况

纸坊沟流域位于甘肃省平凉市城南,地理坐标为

东经  $106^{\circ}37' - 106^{\circ}42'$ 、北纬  $35^{\circ}26' - 35^{\circ}33'$ , 属泾河干流一级支沟, 是陇东黄土高原沟壑区的典型代表区, 也是黄河流域最早确立的重点治理小流域之一, 地形地貌为黄土高原残塬沟壑区, 地表地层为第四纪全新世黄土层, 沟谷地带为第四纪上新世红黏土。流域上游源于六盘山—太统山脉的虎狼山, 下游横穿平凉东城区入泾河干流, 流域总面积  $18.98 \text{ km}^2$ , 海拔高程  $1365.00 \sim 2104.00 \text{ m}$ , 相对高差  $739.8 \text{ m}$ , 主沟道长  $15.77 \text{ km}$ , 沟道平均坡降  $4.34\%$ , 沟道密度  $3.02 \text{ km/km}^2$ 。流域多年平均气温  $8.8^{\circ}\text{C}$ 、年降水量  $548.7 \text{ mm}$ 、年蒸发量  $1499.2 \text{ mm}$ 、年日照时数  $2381 \text{ h}$ 。流域总土地面积  $1898 \text{ hm}^2$ , 其中耕地面积  $905.6 \text{ hm}^2$  (梯条田  $718.8 \text{ hm}^2$ , 山坡地  $120.6 \text{ hm}^2$ , 沟坝地  $56.28 \text{ hm}^2$ ), 疏林草地面积  $217.4 \text{ hm}^2$ , 林地面积  $280.6 \text{ hm}^2$ , 草地面积  $175.1 \text{ hm}^2$ , 荒山荒坡面积  $144.6 \text{ hm}^2$ , 居民住宅及其它用地面积  $174.7 \text{ hm}^2$ 。流域水土流失面积  $1500 \text{ hm}^2$ , 占总面积的  $79\%$ , 水土流失严重, 但经过半个多世纪的不间断治理, 流域水土流失面积已治理  $1221 \text{ hm}^2$ , 治理程度已达  $81.4\%$ , 植被覆盖率达  $35.5\%$ , 土壤侵蚀模数降低到了  $7472 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

流域内有平凉市崆峒区的崆峒、峡门、柳湖 3 个乡镇 8 个行政村的 24 个社及 7 个企事业单位, 共 8798 人, 其中农业人口 1245 户 7010 人, 农村劳动力 4199 个, 城市人口 1788 人, 人口密度  $464 \text{ 人/km}^2$ 。

## 2 研究方法与数据资料

研究方法是通过流域降水、径流、洪水、泥沙观测资料和流域植被、治理程度调查资料的数理统计和矩阵计算, 分析出流域不同阶段的降水量、径流量、土壤侵蚀流失量和治理度以及平均年变化量, 用排除法分析出影响流域水土流失的主要因子, 由各影响因子平均每年减少或提高的百分数绝对值占各因素平均每年减少或提高百分数绝对值之和的百分数分析计算出影响因子变化对流域土壤侵蚀流失量变化的影响程度, 再用相关分析法分析土壤侵蚀流失量与各影响因子的相关性和密切度, 进而用直线回归方程法研究确定流域土壤侵蚀流失量与各影响因子之数学模型式。

研究数据中降水分析取用纸坊沟流域 6 个观测站点 1955—2004 年观测资料, 径流、洪水分析取用一坝、二坝及何家庄水文站 1955—2002 年观测资料, 泥沙分析取用一坝、二坝及何家庄水文站 1959—1997 年观测资料, 相互关系分析取用两者中系列较短的对应观测资料。

## 3 流域水土流失状况

纸坊沟流域水土流失形式以水力侵蚀为主, 并伴有因水力侵蚀而诱发的重力侵蚀, 上游局部地段和时段有轻度冻融侵蚀, 总体上流域土壤侵蚀流失主要是水力侵蚀, 是由降雨击溅侵蚀、分散的地表径流侵蚀和集中汇流侵蚀破坏原状土体的抗蚀力而产生的侵蚀过程, 侵蚀程度强烈。

用纸坊沟流域一坝水文站 1959—1997 年 39 a 泥沙观测资料分析推算出的纸坊沟流域历年土壤侵蚀量统计分析, 纸坊沟流域多年平均年土壤侵蚀流失量为  $14.182 \text{ 万 t}$ , 最大年侵蚀流失量为  $42.323 \text{ 万 t}$  (1996 年), 最小年侵蚀流失量  $3.668 \text{ 万 t}$  (1988 年); 由此计算出流域多年平均土壤侵蚀模数为  $7472 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 最大土壤侵蚀模数为  $22299 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 最小土壤侵蚀模数  $1933 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ; 计算得流域多年平均年土壤侵蚀深度为  $5.6 \text{ mm}$ , 最大年侵蚀深度为  $16.8 \text{ mm}$ , 最小年侵蚀深度为  $1.5 \text{ mm}$ 。按 SL190—96《土壤侵蚀分类分级标准》划分, 纸坊沟小流域土壤侵蚀流失类型为强度侵蚀区。

## 4 流域水土流失影响因子及影响程度

### 4.1 影响因子分析

水土流失的影响因素一般包括自然因素和社会因素两大类, 其中自然因素是水土流失发生、发展的潜在条件, 人为活动是水土流失发生、发展和控制的决定因素。具体到纸坊沟小流域, 按其流失形式和观测资料分析, 影响因素有降水、径流、地形地貌、地质地层、土壤垫层、植被、流域治理状况 7 个因子。其中降水是产生径流引起地表侵蚀的渊源, 径流是挟带移动侵蚀土料泥沙的主要动力, 植物覆盖是阻止水土流失的自然影响因素, 流域治理是人为阻止水土流失的社会影响因素, 这四者随着自然环境和社会生产条件的变化在不断变化, 从而引起流域水土流失的加剧或减少, 是影响小流域水土流失的主要因素, 是变量因子; 而地形地貌、地质地层、土壤垫层虽也是流域水土流失的重要影响因素, 但对多年在同一区域进行观测试验的纸坊沟小流域来说, 它们具有黄土高原残塬沟壑区的共性和普遍特征, 且几十年来变化都很微小, 基本是一个固定因子。所以, 纸坊沟小流域水土流失的主要影响因素是降水、径流、植被和流域治理 4 个因子。

### 4.2 主要影响因子对土壤侵蚀流失的影响程度分析

由流域降水、径流、泥沙特性值及流域治理度统计值按每 10 年分段分析研究, 得出 1970—1999 年每

10 年平均年降水量比前期减少 2.2%~7.3%,累计减少了 11.9%,平均每年减少 0.3%;同期每 10 年平均年径流量比前期减少 10.7%~41.4%,累积减少了 68.1%,平均每年减少 1.7%;每 10 年平均年土壤

侵蚀流失量比前期减少 8.6%~25.50%,累计减少 47.9%,平均每年减少 1.9%;每 10 年平均年治理度比前期提高 2.8%~4.2%,累计提高 64.3%,平均每年提高 3.1%。各因素各阶段的变化分析结果见表 1。

表 1 纸坊沟流域降水、径流、流域治理度、土壤侵蚀流失量各阶段变化分析结果

因素	1970—1979 年	1980—1989 年	1990—1999 年	1960—1999 年	多年平均
年降水量	比前期-2.2%	-7.3%	-2.92%	-11.9%	-0.3%
年径流量	比前期-10.7%	-38.9%	-41.4%	-68.1%	-1.7%
年土壤侵蚀流失量	比前期-23.5%	-25.5%	-8.6%	-47.9%	-1.9%
年流域治理度	比前期+4.2%	+2.9%	+2.8%	+64.3%	+3.1%

注:①前期指前 10 年的 1960—1969 年,后面时段均是与前面 10 年比较;②年土壤侵蚀流失量的变化是用 1960—1997 年资料分析的;③+表示增加,-表示减少。

各影响因素变化对流域土壤侵蚀流失量变化的影响程度按其平均每年减少或提高的百分数绝对值占各因素平均每年减少或提高百分数绝对值之和的百分数计算,则降水量变化对流域土壤侵蚀流失量减少的影响程度为 5.9%,地表径流量变化对流域土壤侵蚀流失量减少的影响程度为 33.3%,流域治理程度提高对流域土壤侵蚀流失量减少的影响程度为 60.8%。从中得出,一般情况下,提高流域治理程度是减少流域水土流失的重要途径。

5 影响因子间相互关系分析

5.1 流域降水与径流相关关系及数学模型

根据流域降水与径流特性分析,纸坊沟流域地表径流是由降水补给并随其变化而变化的,两者的统计指标值  $\sigma$ 、 $C_s$ 、 $C_v$  等都很接近,基本特征几乎一致。所以,用流域 1955—2002 年相同时段年降水量与年径流深(即径流模数)进行线性相关分析,得出两者相关系数  $r=0.71$ ,大于  $r_{0.001}=0.45$ ,表明纸坊沟流域降水量与径流量具有密切相关关系。因此,用直线回归关系方程式来分析确定流域年径流模数与年降水量之数学模型式为

$$M=a_{雨}+b_{雨}H \tag{1}$$

式中: $M$ ——年径流模数[万  $m^3/(km^2 \cdot a)$ ]; $H$ ——年降水量(mm); $a_{雨}$ 、 $b_{雨}$ ——待定参数,由  $a_{雨}=\bar{M}-b_{雨}\bar{H}$  和  $b_{雨}=\sum(H_i-\bar{H})(M_i-\bar{M})/\sum(H_i-\bar{H})^2$  计算; $\bar{M}$ ——流域实测多年平均年径流模数,为 4.507 万  $m^3/(km^2 \cdot a)$ ;  $\bar{H}$ ——流域实测多年平均年降水量,为 548.7 mm;  $M_i$ ——流域实测历年年径流模数[万  $m^3/(km^2 \cdot a)$ ];  $H_i$ ——流域实测历年年降水量(mm)。

用流域 1955—2002 年实测年降水量与年径流模数资料系列分析计算,求得待定参数  $a_{雨}=-6.12494$ , $b_{雨}=0.019375$ 。将两参数代入拟定的回归方程式,得出流域年径流模数与年降水量关系之数学模型式为  $M=0.019375H-6.12494$ 。

5.2 流域降水与土壤侵蚀相关关系及数学模型

根据流域降水与土壤侵蚀特性分析,纸坊沟流域土壤侵蚀主要是水力侵蚀形成,其基本特征和变化规律与降水基本一致,但不同阶段降水量与土壤侵蚀量相关密切度不同。

(1)年降水与年土壤侵蚀相关关系:用流域 1959—1997 年同期年降水量与土壤侵蚀量进行线性相关分析,得出两者相关系数  $r=0.31$ ,小于  $r_{0.001}=0.44$ ,说明流域年降水量与年土壤侵蚀量关系不密切,相关性不强,不能建立相关关系。

(2)汛期降雨与年土壤侵蚀量相关关系:用流域 1959—1997 年 6—9 月年汛期降雨量与土壤侵蚀流失量进行线性相关分析计算,得出两者相关系数  $r=0.63$ ,大于  $r_{0.001}=0.504$ ,说明流域年汛期降雨量与年土壤侵蚀量具有密切相关关系。因此,用直线回归关系方程式来分析确定流域年土壤侵蚀模数与年汛期降雨量之数学模型式为

$$M_s=a_{汛}+b_{汛}H_{汛} \tag{2}$$

式中: $M_s$ ——土壤侵蚀模数( $t/km^2/a$ ); $H_{汛}$ ——汛期降雨量(mm); $a_{汛}$ 、 $b_{汛}$ ——待定参数,由  $a_{汛}=\bar{M}_s-b_{汛}\bar{H}_{汛}$  和  $b_{汛}=\sum(H_{汛i}-\bar{H}_{汛})(M_{si}-\bar{M}_s)/\sum(H_{汛i}-\bar{H}_{汛})^2$  计算; $\bar{M}_s$ ——流域实测多年平均年土壤侵蚀模数,为 7 472  $t/(km^2 \cdot a)$ ;  $\bar{H}_{汛}$ ——流域实测多年平均汛期降雨量,为 388.3 mm;  $M_{si}$ ——流域实测历年年土壤侵蚀模数 [ $t/(km^2 \cdot a)$ ];  $H_{汛i}$ ——流域实测历年汛期降雨量(mm)。

用流域 1959—1997 年实测年汛期降雨量与年土壤侵蚀模数系列分析计算,求得待定参数  $a_{汛}=-788.826$ , $b_{汛}=21.1994$ 。将两参数代入拟定的回归方程式,得出流域年土壤侵蚀模数与年汛期降雨量关系之数学模型式为  $M_s=21.1994H_{汛}-788.826$ 。

5.3 流域径流与土壤侵蚀相关关系及数学模型

根据流域径流与土壤侵蚀特性分析,流域径流与土壤侵蚀流失都是因降水形成,而且三者基本特征和变化规律基本一致,由此推断,流域径流与土壤侵蚀

有较强相关性。所以,用流域 1959—1997 年同期年径流量与土壤侵蚀流失量进行线性相关分析计算,得出两者相关系数  $r=0.75$ ,大于  $r_{0.001}=0.504$ ,表明流域径流量与土壤侵蚀量具有密切相关关系。因此,用直线回归关系方程式来分析确定流域年土壤侵蚀模数与年年径流模数之数学模型式为

$$M_s = a_{\text{径}} + b_{\text{径}} M \quad (3)$$

式中:  $M_s$ ——年土壤侵蚀模数 [ $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ];  $M$ ——年径流模数 [ $\text{万 m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ];  $a_{\text{径}}, b_{\text{径}}$ ——待定参数,由  $a_{\text{径}} = \bar{M}_s - b_{\text{径}} \bar{M}$  和  $b_{\text{径}} = \sum (M_i - \bar{M})(M_{si} - \bar{M}_s) / \sum (M_i - \bar{M})^2$  计算;  $\bar{M}$ ——流域实测多年平均年径流模数,为  $4.507 \text{ 万 m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ;  $M_{si}$ ——流域实测历年年土壤侵蚀模数 [ $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ];  $M_i$ ——流域实测历年年径流模数 [ $\text{万 m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ]。

用流域 1959—1997 年实测年径流模数与年土壤侵蚀模数系列分析计算,求得待定参数  $a_{\text{径}} = 3252.85, b_{\text{径}} = 897.6914$ 。将两参数代入拟定的回归方程式,得出流域年土壤侵蚀模数与年径流模数关系之数学模型式为  $M_s = 897.6914M + 3252.85$ 。

#### 5.4 流域治理度与土壤侵蚀相关关系及数学模型

根据流域水土流失影响因素及其影响程度分析,

表 2 纸坊沟流域降水、径流、流域治理度、土壤侵蚀流失间回归关系显著性检验指标分析结果

回归关系	均方比 $F$	临界值 $F_\alpha$	概率数 $P_F$	显著性 $1-P_F$
年径流模数与年降水量	47.001	7.21	0.01	0.99
年径流模数与年汛期降雨量	12.132	7.35	0.01	0.99
年土壤侵蚀模数与年径流模数	33.051	7.35	0.01	0.99
年土壤侵蚀模数与流域治理度	122.223	7.35	0.01	0.99

由表 2 可知,纸坊沟流域降水、径流、综合治理度、土壤侵蚀流失间单因子数学模型回归关系式的方差比  $F > F_\alpha$ ,且  $P_F$  均为 0.01,均小于 0.05,显著度又都达到 0.99,表明分析建立的流域降水、径流、治理程度、土壤侵蚀流失量间单因子数学模型式回归关系均很显著。

## 6 结论

通过分析研究,地处黄土高原沟壑区的纸坊沟小流域属强度侵蚀区,在同一区域地形地貌、地质地层、土壤垫层多年来只有微小变化的情况下,引起水土流失变化的主要影响因素是降水、径流、植被和流域治理 4 个因子。其中降水量变化对流域土壤侵蚀流失量减少的影响程度为 5.9%,地表径流量变化对流域土壤侵蚀流失量减少的影响程度为 33.3%,流域治理程度提高对流域土壤侵蚀流失量减少的影响程度高达 60.8%。年降水量与年径流量、各年汛期降雨量与土壤侵蚀模数、年径流量与土壤侵蚀模数、流域年治理度与土壤侵蚀模数均成直线相关关系,且关系

流域年治理度不仅是土壤侵蚀流失减少的主要影响因素,而且影响程度达 60.8%,说明流域年治理度与土壤侵蚀流失相关性较强。所以,用流域 1959—1997 年流域年治理度与土壤侵蚀流失量进行线性相关分析计算,得出两者相关系数  $r=0.77$ ,大于  $r_{0.001}=0.51$ ,表明流域年治理度与土壤侵蚀量具有密切相关关系。因此,用直线回归关系方程式来分析确定流域年土壤侵蚀模数与年综合治理度关系之数学模型式为

$$M_s = a_{\text{治}} + b_{\text{治}} R \quad (4)$$

式中:  $M_s$ ——年土壤侵蚀模数 [ $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ];  $R$ ——流域治理度(%);  $a_{\text{治}}, b_{\text{治}}$ ——待定参数,由  $a_{\text{治}} = \bar{M}_s - b_{\text{治}} \bar{R}$  和  $b_{\text{治}} = \sum (R_i - \bar{R})(M_{si} - \bar{M}_s) / \sum (R_i - \bar{R})^2$  计算;  $R$ ——流域多年平均年治理度,为 47.5%;  $R_i$ ——流域实测历年治理度(%)。

用流域 1959—1997 年实测年综合治理度与年土壤侵蚀模数系列分析计算求得待定参数  $a_{\text{治}} = 11750.605, b_{\text{治}} = -110.918$ 。将两参数代入拟定的回归方程式,得出流域年土壤侵蚀模数与年综合治理度关系之数学模型式为  $M_s = 11750.605 - 110.918R$ 。

#### 5.5 数学模型回归关系显著性检验

按照统计学原理,回归关系显著性检验指标见表 2。

密切,由此用直线回归关系方程法分析确立了纸坊沟流域年径流模数与年降水量、土壤侵蚀模数与年汛期降雨量、土壤侵蚀模数与年径流模数、土壤侵蚀模数与流域年治理度间四个单因子数学模型。

分析确立的四个单因子数学关系式虽与水土流失受多因子影响理论有相悖之处,但对缺乏径流泥沙观测资料的小流域来说,利用流域或邻近的降水资料来估算径流泥沙和水土流失量有一定价值。我们在课题研究总结时曾用平凉市泾河流域内的纸坊沟、杜家沟、蒋家沟、小路河四个小流域降水资料推算其径流模数、土壤侵蚀模数,与《甘肃省水文图集》和《平凉地区水土保持区划》上的等值线查阅值比较,相差在  $\pm 10\%$  间,准确度较高,可以在相近流域参考运用。

参考文献:

- [1] 王静. 祖厉河流域泥沙变化规律初谈[J]. 甘肃科学学报, 2000(2): 46-48.
- [2] 冉大川, 柳林旺, 赵力仪, 等. 黄河中游河口至龙门区间水土保持与泥沙变化[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000.