

# 应用地理信息系统评价黄土丘陵区 小流域土壤侵蚀的研究

江忠善 王志强 刘 志

(中国科学院水土保持研究所·陕西杨陵·712100)  
水利部

**摘 要** 以小流域为单元进行土壤侵蚀空间变化的定量动态研究,是探索土壤侵蚀规律和评价流域治理效益的一个重要途径和内容。以陕北黄土丘陵区安塞县纸坊沟流域内的两个小流域为研究实例,在分析野外小区观测资料建立土壤侵蚀模型的基础上,应用由 ARC/INFO 地理信息软件系统支持建立的空间信息数据库系统和土壤侵蚀模型相结合的方法,进行了小流域次降雨土壤侵蚀空间变化的定量计算。进而研究了流域内侵蚀强度的空间变化规律及其与地貌和土地利用的关系。实测资料检验结果表明,研究建立的预报方法,具有较高的计算精度。  
**关键词** 黄土丘陵区 小流域 地理信息系统 土壤侵蚀模型 土壤侵蚀定量评价

## Study on the Use of GIS to Estimate Soil Erosion in a Small Watershed in the Loess Hilly Region

Jiang Zhongshan Wang Zhiqiang Liu Zhi

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences  
and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi, 712100)

**Abstract** Taking two small catchments in Zhifanggou watershed in the loess hilly region near Ansai county of Northern Shaanxi as study example, the prediction models of soil erosion have been developed on the basis of analysing the field observation data, and the spatial information database about soil erosion affecting factors has been established under the support of ARC/INFO software of geographical information system (GIS). Using the methods of integrate GIS with soil erosion models, the soil erosion of single rainfall in small watershed was quantitatively and spatially estimated. The spatial variation law of soil erosion intensities within a small watershed and the relationships between erosion intensities and landform or land use were researched. The results of testing from observed data showed that the method has a good prediction accuracy.

**Key words** loess hilly region small watershed geographical information system soil erosion model quantitative estimation of soil erosion

## 1 前言

土壤侵蚀的发生发展,是侵蚀动力因素和侵蚀环境因素综合影响的结果。目前,国内外在坡面侵蚀的动力过程和预报模型方面的研究,已取得了较快的发展。但是,由于影响土壤侵蚀的动力—环境因素时空变化的复杂性,对流域侵蚀产沙空间变化的定量研究进展缓慢。特别是在我国黄土高原丘陵沟壑区,地形破碎,侵蚀方式复杂多变,使得定量研究土壤侵蚀空间变化的工作难度增大。直到近年来,随着地理信息系统(GIS)技术的迅速发展和应用,采用土壤侵蚀模型和地理信息系统相结合的方法<sup>[1,2,3]</sup>,使得土壤侵蚀空间变化这一重要问题的定量模拟研究得到了加强和发展,并使土壤侵蚀的研究有了一个新的发展方向。

目前,在应用地理信息系统技术进行流域地块土壤侵蚀的定量计算中,现已使用的土壤侵蚀模型大多数是经验模型<sup>[1,3,4]</sup>,并取得了较好的应用效果。其中通用土壤流失方程(USLE)是主要的坡面侵蚀模型,但它的应用范围具有一定的条件和限制。此外,有的学者试图将基于土壤侵蚀过程及其侵蚀机理而建立的具有一定物理基础的概念模型与地理信息系统联系起来<sup>[2]</sup>。但是,这类模型的大多数只能模拟坡面溅蚀、水流片蚀和细沟侵蚀过程,而对于各种类型的沟蚀、重力侵蚀未能包括在内。因此,迄今还缺乏可用于计算小流域地块土壤侵蚀的实用化预报模型系统。

鉴此,我们针对黄土丘陵区小流域侵蚀地貌的基本特征和沟蚀严重的特点,从为水土保持措施优化配置设计服务的目的出发,本文试图依据野外小区观测资料的分析建立一种以地块土壤侵蚀为基础来推算小流域次降雨侵蚀量的计算模型,进而在地理信息系统的支持下,进行小流域土壤侵蚀空间变化的定量评价,以及侵蚀强度空间分布规律的研究。

## 2 试验研究区概况

本研究选择陕北安塞县纸坊沟流域内的寺腰峁和小范家沟两条支沟作为试验研究区(图1)。纸坊沟位于陕北中部,属延河支流杏子河下游的一级支沟。整个流域梁峁起伏,沟壑纵横,地形破碎,具有典型的黄土高原梁峁状丘陵区地貌特征。从80年代初起,纸坊沟流域就被确定为黄土丘陵区水土保持综合治理科学试验区,同时,试验区所在的安塞水土保持综合试验站,在坡面和小流域水土流失方面陆续开展了定位试验观测,迄今已取得了大量的科学试验资料,以及有关专题图件和航空遥感资料等。这为本项工作的顺利进行奠定了良好的基础。

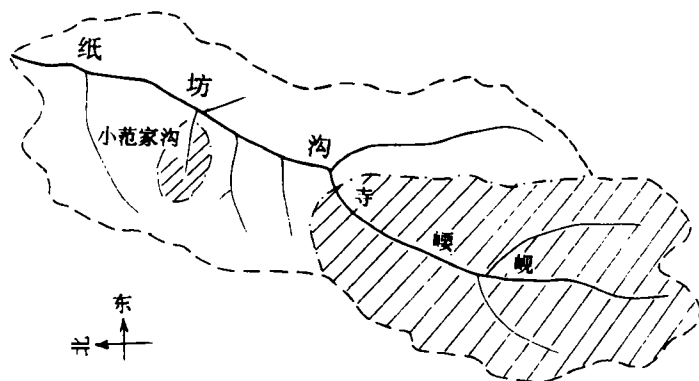


图1 研究区位置

作为研究实例的寺峪峁和小范家沟小流域,除了具有黄土丘陵区一般自然地理环境特征的共性外,它们又有各自不同的特点:寺峪峁流域面积 $3.605\text{km}^2$ ,位于纸坊沟主沟上游,植被稀疏,流域土壤侵蚀较严重,代表目前治理程度低的黄土丘陵区小流域的一般情况;小范家沟面积 $0.182\text{km}^2$ ,属于纸坊沟流域重点治理的支沟之一,其中尤以人工林草植被覆盖较好,代表目前治理程度较高的小流域的一般情况。

### 3 土壤侵蚀空间信息数据库的建立

流域侵蚀产沙空间变化的定量计算和预测依赖于侵蚀环境空间信息数据的支持。本研究从实际流域的侵蚀过程出发,将影响流域侵蚀的环境因素概化为降雨动力因素和下垫面因素两大类。根据这次土壤侵蚀建模的分析,降雨特性因子中的降雨量和最大30min雨强是影响侵蚀产沙的主要动力因子;下垫面因素主要有地表土壤物质的可蚀性、地形因素坡度坡长、土地利用方式、植被覆盖度和水土保持措施等因素。其中,由于本研究用于土壤侵蚀建模的主要观测资料来自布设于试验站的母质性黄绵土径流小区,其土壤性质与流域内分布的大多数土壤基本相同。因此,这里除了流域沟谷中的土石质土坡地,依据它与黄土抗侵蚀性的差异程度加以修正外,不再将土壤可蚀性作为一个单独因子考虑。

#### 3.1 信息采集和预处理

信息采集和预处理是建立数据库工作的基础。在本项研究中,以 $20\text{m}\times 20\text{m}$ 的网格形式作为空间数据采集和分析的基本单元,它不仅对地形复杂的黄土丘陵区进行微地貌形态的数量特征分析有特殊的意义,而且,还可以使影响土壤侵蚀的土地利用、植被和水土保持措施等因素都能达到各自分类系统的最小单元。从而不需要作特别处理,它们就可以直接满足土壤侵蚀模型的分析计算需要。

**3.1.1 试验区坡度值的获取** 目前,利用图像处理系统技术进行数字地形模型(DTM)的建立,已经成为获取地形要素的一个重要手段。本次在前人研究工作<sup>[5]</sup>的基础上,将图像处理系统与地理信息系统结合起来,以获得 $20\text{m}\times 20\text{m}$ 网格DTM的坡度灰度值,进而通过转换数学模型,由灰度值计算得到相应网格像元的实际坡度值。具体坡度值的获取过程见图2。

(1)地面高程数据的采集。地面高程数据采自于野外控制测量的资料和同期的1:10 000彩红外航空像片,应用 $A_{10}$ 精密立体测图仪,在绘制1:5 000地形图的同时,测取得 $20\text{m}\times 20\text{m}$ 的网格结点高程数据。以此作为地理空间位置的控制和数据框架结构。

(2)网格像元坡度灰度值的提取。高程数据采集之后,首先使用LOTUS-123软件建立起高程数据文件,再用STATGRAPH软件,将其转换成标准的ASCⅡ格式,然后进入microBRIAN图像处理系统进行光照模拟自动提取坡度灰度信息。根据李锐等<sup>[5]</sup>的研究,选用了太阳高度角 $45^\circ$ 及其方位角 $135^\circ$ 进行光照模拟处理后,就把原先每个网格像元的高程值转变成相应的亮度值。然后,再对所提取的网格像元亮度值进行数学处理,即分别求其亮度值的一阶导数,就得到了分别以0~255共256个灰阶表示的对应像元的坡度灰度值。

(3)网格像元实际坡度值的获取。此项工作是在ARC/INFO系统中进行的。首先,在计算机图像显示屏幕上选择灰度值从0~255范围内的典型网格点,记下每个网格的坡度灰度值 $J$ 和其位置,再在1:5 000地形图上量测对应网格的实际地面坡度 $S$ ,并在野外进行了校正。然后,经对采集的400个网格样本资料的统计分析,得到表1中的坡度与灰度值的关系式。根据表1中的分段公式,就可以把所有的网格灰度值转变为实际坡度值及其所对应的空间位置。经对400组样本资

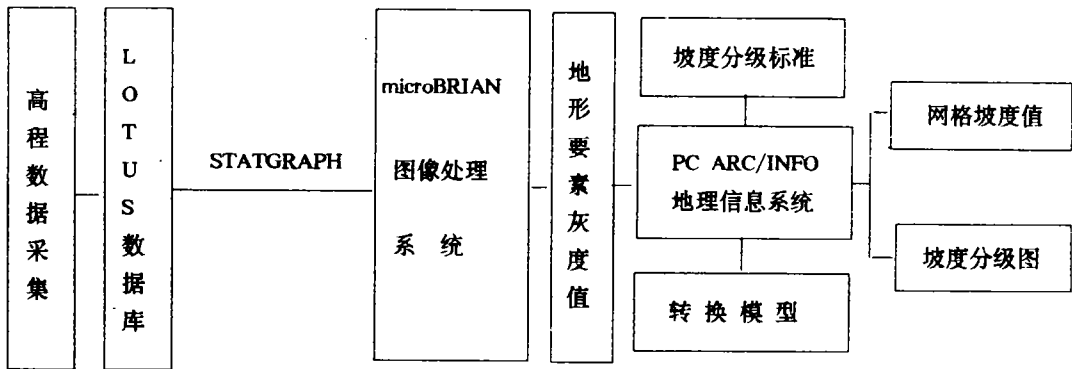


图2 坡度获取的流程

料的检验,坡度计算值的相对误差,一般小于10%。

表1 坡度转换模型

灰度值范围	函数关系式	相关系数
1~126	$S = 2.683 + 0.0305J$	$r = 0.971$
127~185	$S = -3.3125 + 0.075J$	$r = 0.984$
186~212	$S = -48.137 + 0.32J$	$r = 0.967$
213~241	$S = -221.291 + 1.135J$	$r = 0.990$

3.1.2 土壤侵蚀影响因子地块图编制及其编码系统 (1)侵蚀因子地块图编制。本研究中作为实例的试验流域面积小于4km<sup>2</sup>,由于流域降雨分布一般比较均匀,其降雨参数采用均值计算。因此,在侵蚀因子地块图上,主要是反映侵蚀环境下垫面因子的空间变化情况。首先,利用研究区现有的专题图件和航片资料,结合野外调查进行校正和填图,然后以1:5000地形图为底图,编制了地貌类型图(含水系网和地表物质类型)、土地利用类型图、植被覆盖度图和水土保持措施分布图等专题图件。最后,将这些专题图件严格对准叠合,描绘所有的边界线,就得到了侵蚀因子地块图。

表2 属性编码模型

属性编码	第一位	第二位	第三位
	地貌部位	土地利用	水保措施
0			无水保措施
1	梁峁坡	农地	水平梯田
2	沟谷坡	林地	坡式梯田
3	土石质土沟道	果园地	水平沟种植
4	塌地	草地	草粮带状间轮作
5		居民地	草灌带状间作
6		石质沟床	
7		坝地	

(2)地块图属性编码。在地块图中,每一个地块都可能包含了几种不同的侵蚀环境属性。有的

属性是用数值表示的,例如植被覆盖度等。有的属性是用文字描述的,如土地利用方式等,对这些非数值表示的属性,则要进行属性编码处理。本研究采用了三位数的编码模型(表2),第一、二、三位数分别表示在各自不同分类系统中的属性类型的编码。例如第一位数的1~4分别表示梁崩坡、沟谷坎、土石质土沟道和塌地等的四种地貌类型。在图斑与图斑之间,只要有一位数字的不同,就意味着这两个地块的侵蚀环境属性有所不同。例如110代表梁崩坡未治理的农地,而111代表梁崩坡水平梯田农地。

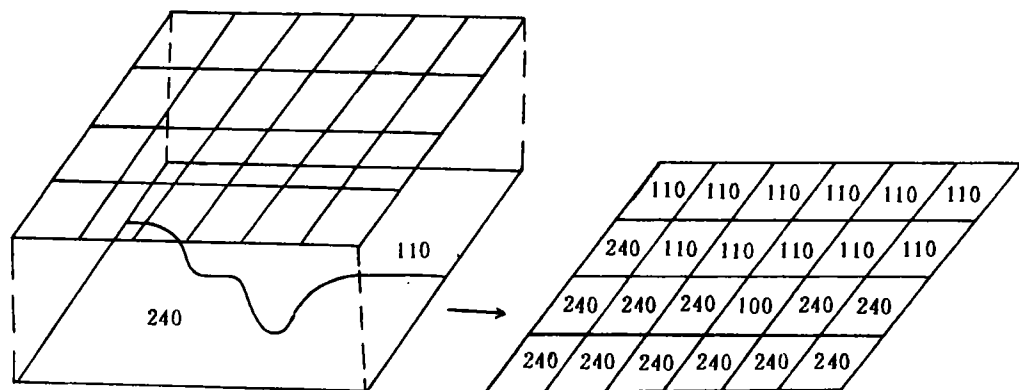


图3 网格数据获取举例

(3)空间网格属性数据表的填写。前已述及,本研究是采用了20m×20m 网格作为土壤侵蚀计算的基本单元,所以,还需对地块图进行网格化处理,以建立与DTM相匹配的空间属性数据存贮单元。首先,在网格化的地块图上,逐行逐个直接读取地块图网格属性面的编码数据(图3),并填写在表3所示的网格属性(含林草

地植被

表3 空间网格属性码填写表

网格编号	地貌部位	土地利用	水土保持措施	植被类型	植被盖度
1	1	1	0	11	0
.	.	.	.	.	.
2	2	4	0	42	30
.	.	.	.	.	.

覆盖度)编码表内,即字典库,并在逐行网格的第一列网格设置一个自然数顺序码。采用这种方法分别对寺峨岷和小范家沟的侵蚀因子地块图进行了处理,寺峨岷流域共9 014个网格,小范家沟454个。通过属性编码模型和字典库,就知道了流域内每个网格的侵蚀环境地理属性情况。

### 3.2 数据库的建立

土壤侵蚀空间信息数据库的建设,主要包括空间位置图形和侵蚀环境属性两大类数据的计算机输入和编辑两部分工作(图4)。在设计过程中,为了节约贮存空间,图形库与属性库,采取统一格式,统一输入,分开管理的方式,在两库之间设置灵活接口,使它们既有各自特定的目标,又是相互联系的整体。

专题图包括地貌类型、土地利用,植被覆盖度和水土保持措施分布图等的输入是一项比较繁琐的工作。它是通过数字化仪和在ARC/INFO系统中,以实现对图形数字化的输入,利用ARCEDIT模块对图形进行网格化编辑,加标记(User-ID)和修改错误,再利用BUILD或CLEAN程序,对每个图形要素进行自动排序,内插和建立多边形拓扑关系与属性文件。属性库的建立过程,首先是将包括地貌部位、土地利用、林草地植被覆盖度、水土保持措施和地形参数等项

数据输入计算机建立 LOTUS-123 文件,然后转换成 dBASE III (PLUS) 关系数据文件,经编辑后形成网格属性数据库。再通过 User-ID 使 dBASE III 属性数据库与 ARC/INFO 系统中的 PAT

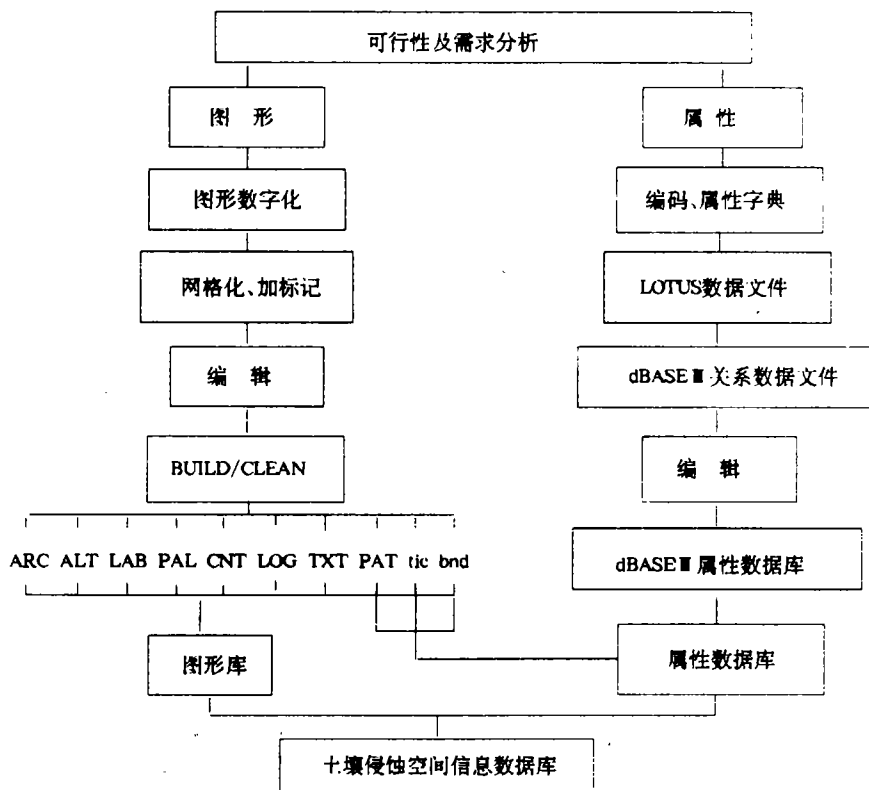


图4 数据库建立过程

文件相互联系,

## 4 小流域土壤侵蚀模型的建立

影响小流域土壤侵蚀时空变化的因素很多,如何建立符合黄土丘陵区实际情况的土壤侵蚀模型,是实现侵蚀预报和模拟的关键。在黄土丘陵区的小流域地块土壤侵蚀建模研究中,考虑地貌的影响是很重要的。因为由于地形坡度和地貌部位的不同,它的主导侵蚀过程就有所不同。在沟间地上以雨滴溅蚀、水流片蚀、细沟侵蚀和浅沟侵蚀为主;而在沟谷地上除了具有某些沟间地的侵蚀特征外,主要为沟蚀,其次是重力侵蚀。基于这个原因,在我们的流域侵蚀建模设计中,将沟间地和沟谷地区别对待,分别建立适用于沟间地和沟谷地的土壤侵蚀模型,但有一点例外,那就是将研究区沟谷地中的塌地按沟间地对待。因为,塌地中的绝大部分土地被开垦为农地,地面坡度较缓,同时,它的周边多有天然排水沟道,受上部沟间地来水的影响较小,土壤侵蚀方式与梁峁坡沟间地相近。

### 4.1 沟间地土壤侵蚀模型

在黄土丘陵区,通常梁峁坡地的绝大部分为农地,或者有少量的为退耕的人工草灌地。据研究<sup>[6]</sup>,当以裸露农地径流小区作为基准状态,此时影响土壤侵蚀的因素主要有降雨量、最大30min雨强、坡度和坡长。经对安塞站1985~1991年7年不同坡度与坡长裸露农地径流小区观测资料的多元统计分析,推求得在次降雨情况下,计算裸露农地基准状态的坡面土壤侵蚀模型为:

$$M_0 = 5.097P^{0.999}I_{30}^{2.637}S^{0.880}L^{0.286} \quad (1)$$

$$n = 300, R = 0.846, F = 185.8^{**}$$

式中:  $M_0$  为裸地基准状态下的次降雨侵蚀模数 ( $t/km^2$ );  $P$  为次降雨量 (mm);  $I_{30}$  为次降雨最大 30min 雨强 (mm/min);  $S$  为地面坡度 ( $^\circ$ );  $L$  为坡长 (m)。

显然,上述的基准状态坡面土壤侵蚀模型,它仅适用于只有片蚀和细沟侵蚀的裸地条件。实际上,一个地块中既可能有浅沟侵蚀的存在,还有植被和水土保持措施的影响。在综合考虑这些因素的影响后,于是计算沟间地坡面土壤侵蚀的模型应为:

$$M_s = M_0 HC \eta \quad (2)$$

式中:  $M_s$  为侵蚀模数 ( $t/km^2$ );  $M_0$  由式(1)确定;  $H$  为浅沟侵蚀系数,无量纲;  $C$  为植被影响系数,无量纲;  $\eta$  为水土保持措施影响系数,无量纲,无水土保持措施时,其系数值取为 1.0。

现将式(2)中的各个参数的确定方法分述如下。

1. 浅沟侵蚀系数的确定。浅沟侵蚀是梁峁坡地中下部坡面侵蚀的重要方式之一。根据在安塞试验区的调查,发生浅沟侵蚀的坡面,其地面坡度绝大多数是在  $20^\circ \sim 35^\circ$  的范围内,当地面坡度小于  $15^\circ$  时,几乎无浅沟发育分布,并且在一定的坡度范围内,单位宽度浅沟条数即浅沟密度是随着坡度的增大而增大。经对 33 个不同坡度农地样方的调查资料统计分析得到下列关系式:

$$D = -0.0655 + 0.0083S - 0.000116S^2 \quad r = 0.809^{**} \quad (3)$$

式中:  $D$  为浅沟密度 (条/m);  $S$  为地面坡度 ( $^\circ$ )。

该方程表明,当地面坡度增至  $36^\circ$  时为浅沟密度的峰值,尔后逐渐减小。这是由于在这种陡峭的梁峁坡地形条件下的坡面较短,降雨时难以形成较强的股流而造成的。由于浅沟的存在,在降雨过程中坡面水流很容易汇聚成股流,使得侵蚀产沙显著增加。根据作者在安塞站的连续 8 年定位观测结果,坡度为  $30^\circ$  的浅沟坡面径流小区年平均侵蚀模数是对照无浅沟径流小区侵蚀模数的 1.401 倍。经对有无浅沟两种状态坡面径流小区的次降雨侵蚀观测资料分别进行回归分析,①得到如下关系:

$$M_h = 5.348(P I_{30})^{2.098} \quad r = 0.774^{**} \quad (4)$$

$$M_r = 5.332(P I_{30})^{1.995} \quad r = 0.808^{**} \quad (5)$$

式中:  $M_h$  和  $M_r$  分别为浅沟坡面和无浅沟坡面单次降雨的侵蚀模数 ( $t/km^2$ ),  $P$ 、 $I_{30}$  符号意义同前。将式(4)与式(5)相除得:

$$H_0 = 1.003(P I_{30})^{0.103} \quad (6)$$

本文定义  $H_0$  为浅沟侵蚀系数。在无植被覆盖的黄土质坡面条件下,浅沟侵蚀系数主要受降雨因素和地面坡度的影响,是一个动态参数。在这里,为了定量描述坡度对浅沟侵蚀系数的影响,我们采用  $15^\circ$  作为坡面浅沟侵蚀发生的临界坡度  $S_c$ ,并且假定浅沟侵蚀系数随坡度的变化为线性关系。这样,在式(6)的基础上考虑地面坡度的影响后,得到当地面坡度大于  $15^\circ$  的浅沟侵蚀系数估算公式:

$$H = 1 + \left( \frac{S - S_c}{S_0 - S_c} \right) [1.003(P I_{30})^{0.103} - 1] \quad (7)$$

因为,浅沟坡面试验的坡度  $S_0 = 30^\circ$ ,浅沟发育临界坡度  $S_c = 15^\circ$ ,将  $S_0$ 、 $S_c$  值代入式(7),则得:

$$H = 1 + \left( \frac{S - 15}{15} \right) [1.003(P I_{30})^{0.103} - 1] \quad (8)$$

① Liu Zhi and Jiang Zhongshan, Quantitative study on ephemeral gully erosion in the gullied-hilly region of the loess plateau of China, 1995.

2. 植被影响系数的确定。地面植被一般可以分为林地、草地和农作物三种类型。这三类植被的保土效益是不同的。就同一类植被而言,影响植被保土效益大小的因素主要是植被覆盖度。以下分别来确定草地、林地和农作物三种类型的植被影响系数。

(1)人工草地植被。人工种草增加地面植被覆盖是一项重要的水土保持生物措施。根据我们在安塞站1987~1991年的沙打旺和红豆草两个人工草地28°径流小区观测资料的分析,在地形因素一定的条件下,人工草地侵蚀量与降雨因素和植被覆盖度之间存在下列关系:

$$M_a = 888.9P^{0.802}I_{30}^{2.919}e^{-0.0488V} \quad n = 88, R = 0.926^{**} \quad (9)$$

式中:  $M_a$  为人工草地侵蚀模数( $t/km^2$ );  $V$  为植被覆盖度(%);  $e$  为自然对数底数。

为了确定草地植被的影响系数,我们将草地小区侵蚀模数与对照裸露农地小区侵蚀模数的比值定义为草地土壤流失系数  $C_1$ , 然后将其与降雨因素和植被覆盖度进行回归分析得:

$$C_1 = 0.1175P^{0.045}I_{30}^{-0.089}e^{-0.044V} \quad R = 0.880^{**} \quad (10)$$

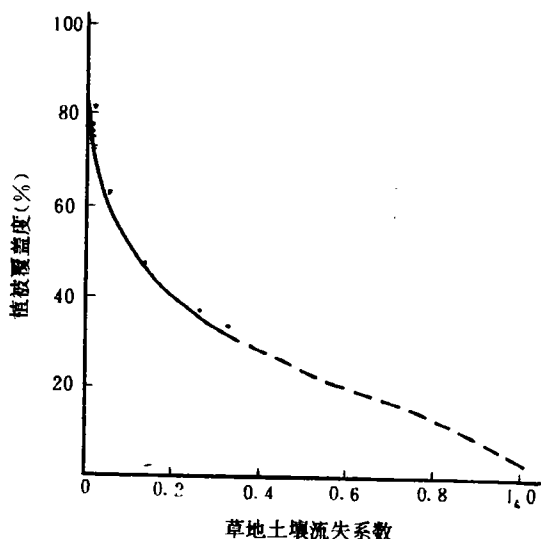
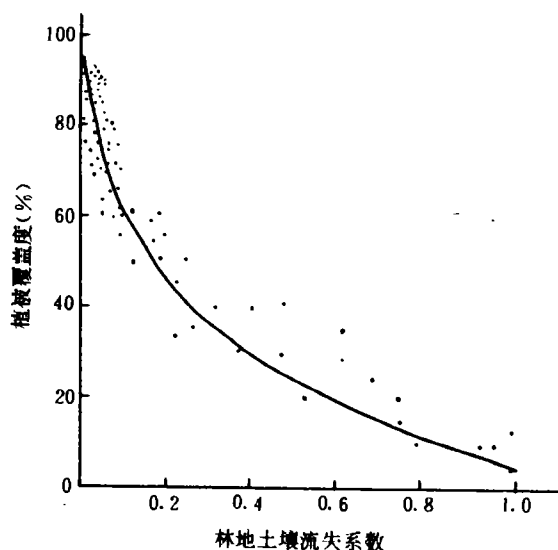


图5 人工草地土壤流失系数与植被覆盖度的关系 图6 林地土壤流失系数与植被覆盖度的关系

比较式(9)与式(10)可知,降雨量的指数从0.802降为0.045,最大30min雨强的指数由2.919下降为负值,而与植被覆盖度有关的系数,由-0.0488变为-0.044变化不大。这说明,降雨因素对侵蚀量的贡献较大,而对相对值土壤流失系数的贡献非常小。显然,草地土壤流失系数的大小主要取决于植被覆盖度,而受降雨因素变化的影响较小(图5),尤其是在植被覆盖度超过50%时的影响更小。同时从资料分析中还发现,当植被覆盖度小于10%时,人工草地土壤流失系数接近于1的数值。据此,将植被覆盖度小于或等于5%时的草地土壤流失系数取为1.0计算。于是,采用植被覆盖度大于5%的降雨侵蚀观测数据进行统计分析,得到下列关系式:

$$C_1 = e^{-0.0418(V-5)} \quad r = -0.968^{**} \quad (11)$$

(2)林地植被。林地植被是防治水土流失最为敏感的植被因素。多年来安塞试验站对不同人工林地植被类型的保持水土作用进行了观测。但是,对植被覆盖度的动态变化缺少系统记载。经分析,我们选用了降雨和林地覆盖度都有代表性的1989年9种不同覆盖度的27°林地小区观测资料,采用上述确定  $C_1$  因子值的类似方法,得到林地土壤流失系数  $C_2$  值与植被总覆盖度  $V$  的关系



图6.通过对观测资料的统计拟合分析,得到人工林地土壤流失系数与植被总覆盖度的关系式为:

$$\begin{aligned} \text{当 } V \leq 5\% \text{ 时, } C_2 &= 1.0 \\ \text{当 } V > 5\% \text{ 时, } C_2 &= e^{-0.0085(V-5)^{1.5}} \quad r = -0.965^{**} \end{aligned} \quad (12)$$

(3)作物农地.农作物纯属于人工植被类型.它对土壤侵蚀的防护效应,一方面远不及林草地显著,另一方面,由于作物生长的季节性特点,农作物植被对土壤侵蚀的影响也随着季节而变化.根据安塞站1987~1992年6年的25°农作物小区和对照裸露农地小区的降雨侵蚀观测资料对比分析,得到如表4按月计算的农作物地土壤流失系数  $C_3$  的数值.由表4中看出,秋作物农地的水蚀土壤流失系数在作物生长季节内的变化规律,表现为以4、5月份最大,7、8月份最小.这与作物生长期间的地面覆盖变化是相一致的.在计算农地土壤侵蚀量时,根据所要计算的降雨侵蚀事件发生的季节月份,查表便可得到农地土壤流失系数  $C_3$  的数值.

表4 农作物地土壤流失系数

月份	4	5	6	7	8	9	10	全年
$C_3$ 值	1.00	0.88	0.67	0.60	0.58	0.62	0.76	0.61

3. 水土保持措施影响系数的确定.多年来安塞试验站较系统地进行了水土保持单项措施减沙效益的试验研究,并取得了一些重要成果<sup>[7,8,9]</sup>.现将除上述人工林草地外的各项水土保持措施的减沙效益比值换算成土壤流失系数  $\eta$  的数值列于表5.

表5 实施水土保持措施后的土壤流失系数

措施	$\eta$ 值	措施	$\eta$ 值
水平梯田	0.02~0.05	垄沟种植	0.60
坡式梯田	0.50	草粮带状间轮作	0.40~0.50
水平沟种植	0.55	草灌带状间作	0.20~0.40

#### 4.2 沟谷地土壤侵蚀模型

在黄土丘陵区,沟谷地一般为放牧天然荒坡,只是在有水土保持治理的情况下,沟坡上有一些人工林草地.至于本研究区中分布着一定面积的塌地农地,这是一种特殊情况.沟谷地上的土壤侵蚀方式复杂多样,特别是重力侵蚀事件发生的不确定性,使得定量研究沟谷地土壤侵蚀的工作非常困难.但就其侵蚀产沙而言,重力侵蚀产沙是与水力因素分不开的.迄今为止,有关研究沟谷地土壤侵蚀的观测资料很少,现有的一些研究也多是偏重于定性描述,而以预报模型的方法定量研究沟谷地土壤侵蚀的几乎是空白.然而,根据已有的资料研究表明,沟谷地上的土壤侵蚀与沟间地的来水来沙有着密切的关系<sup>[10]</sup>.基于这个原因,本文以沟间地的土壤侵蚀模型为基础加以修正来推算沟谷地(塌地除外)的侵蚀量.当然,这是一个初步的探索.

这次在确定沟谷地侵蚀估算模型的参数时,主要是以与安塞纸坊沟自然条件和侵蚀特征基本相同的子洲团山沟大型自然坡面径流场的观测资料为分析的依据.团山沟7号全山坡径流场(4 084m<sup>2</sup>)由梁崩坡和沟谷坡的两部分组成.3号梁崩坡径流场的侵蚀强度可以代表7号径流场中的梁崩坡部位的侵蚀强度.在7号径流场中,梁崩坡面积占该径流场总面积的63.5%,沟坡面积占36.5%.根据1961~1969年的观测资料求得沟坡侵蚀模数,采用的计算公式为:

$$M_{7g} = (M_7 - 0.635M_3)/0.365 \quad (13)$$

式中:  $M_{7g}$  为沟坡侵蚀模数( $t/km^2$ );  $M_7$  为7号径流场侵蚀模数( $t/km^2$ );  $M_3$  为3号径流场侵蚀模数( $t/km^2$ )。

根据式(13)计算得的沟坡土壤侵蚀模数包括了上方沟间地来水来沙的影响。经采用最大30min雨强大于0.25mm/min的降雨侵蚀资料进行回归分析,得到如下关系式:

$$M_{7s} = 79.016(PI_{30})^{1.197} \quad n = 24, r = 0.830^{**} \quad (14)$$

$$M_{7g} = 89.805(PI_{30})^{1.337} \quad n = 24, r = 0.802^{**} \quad (15)$$

式中的  $M_{7s}$ 、 $M_{7g}$  分别为7号径流场的梁峁坡和沟坡侵蚀模数( $t/km^2$ )。将式(15)除式(14),则得:

$$G_g = 1.137(PI_{30})^{0.140} \quad (16)$$

式中  $G_g$  被定义为沟坡沟蚀(含重力侵蚀)系数。显然,这一关系式只适用于与本试验条件相类似的下垫面情况。因此,应用此式来计算沟坡地块土壤侵蚀时,当土质和植被因素与试验条件基本相同的情况下,还要考虑沟坡地块坡度的变化对沟蚀系数的影响。在目前缺少观测资料的情况下,为了估算沟坡的侵蚀量,只得采用经验推理法来求出沟蚀系数。为此,首先是确定在相同的降雨条件下,梁峁坡的平均侵蚀模数与沟坡的侵蚀模数相等时的相应沟坡坡度作为沟蚀系数为1的基准坡度。根据这个定义,目前暂参照梁峁坡的平均坡度加以确定。经分析,在本研究流域采用20°坡度计算。这与团山沟7号径流场的梁坡平均坡度22°十分接近。然后,假定沟蚀系数在20°和7号径流场的沟坡平均坡度42°之间随坡度的大小按线性关系变化或外延。据此,考虑坡度变化的影响,估算黄土沟谷的沟蚀系数  $G$  的表达式为:

$$G = 1 + \left( \frac{S - 20}{42 - 20} \right) [1.137(PI_{30})^{0.140} - 1] \quad (17)$$

为了进一步考虑流域下垫面因素空间变化对侵蚀的影响,以自然水系支毛沟流域为主要控制,将沟道小流域划分为若干个自然集水区计算单元。在每个计算单元中,沟坡的网格单元地块侵蚀量计算的表达式为:

$$M_g = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_{si} \right) G C_g K \quad (18)$$

式中:  $M_g$  为某一个计算单元的沟坡网格单元侵蚀模数( $t/km^2$ );  $M_{si}$  为该计算单元的沟间地第  $i$  个网格的侵蚀模数( $t/km^2$ ),由式(2)计算,对于治理标准高的地块按治理前的计算值代入;  $G$  为沟蚀系数,无量纲,由式(17)来确定;  $C_g$  为沟坡植被影响修正系数,无量纲,在本研究流域天然荒坡直接采用系数为1的数值计算,而对于人工林地和封育草坡则参照沟间地林草地的计算方法和扣除荒坡植被现状覆盖度基数(25%~30%)的影响加以确定;  $K$  为土质类型修正系数,无量纲,对于黄土为1;  $n$  为该计算单元的沟间地网格总个数。

## 5 计算结果与分析

在上述建立的土壤侵蚀空间信息数据库和土壤侵蚀模型的基础上,我们选择了试验流域有代表性的3次典型暴雨为实例,进行了以网格地块为单元的侵蚀量计算和统计分析。这3次降雨的基本情况列于表6。其中1988年8月4日和6月的降雨,代表前后两次降雨间隔时间短的连续出现暴雨的特点;1989年7月16日的降雨量属于大暴雨的级别,此次降雨的最大30min雨强达1.4~1.5mm/min,属极高雨强型侵蚀性暴雨<sup>[6]</sup>。针对这3次降雨侵蚀过程,根据计算得的网格侵蚀强度,由计算机输出编制了土壤侵蚀强度图,同时,统计汇总得到不同地貌部位,不同土地利用方式

下的侵蚀量计算结果列于表7~9。

表6 试验流域3次降雨基本情况

降雨时间 (年.月.日)	小范家沟			寺峪峁沟		
	雨量 (mm)	平均雨强 (mm/h)	最大30 min 雨强 (mm/min)	雨量 (mm)	平均雨强 (mm/h)	最大30 min 雨强 (mm/min)
1988.8.4	39.1	8.5	0.67	76.0	7.2	0.67
1988.8.6	67.4	38.0	1.00	51.0	28.7	1.00
1989.7.16	124.5	14.2	1.40	127.6	15.5	1.50

表7 试验流域不同地貌部位土壤侵蚀强度(t/km<sup>2</sup>)

流域	降雨时间 (年.月.日)	流域侵 蚀模数	沟间地 侵蚀模数	塌地侵 蚀模数	谷坡侵 蚀模数	沟谷地 侵蚀模数
寺 峪 峁	1988.8.4	4952.3	4083.4	1305.0	6629.6	5497.1
	1988.8.6	5956.2	4922.6	1516.2	7957.6	6599.3
	1989.7.16	27054.3	20836.6	8084.2	37009.9	30824.7
小 范 家 沟	1988.8.4	1622.1	2341.9			896.5
	1988.8.6	2464.3	3558.2			1362.2
	1989.7.16	7856.5	10717.7			4123.8

表8 寺峪峁流域各地类的侵蚀量

土地利用				1988.8.4~6			1989.7.16		
类 别	面积 (km <sup>2</sup> )	占总面积 (%)		侵蚀模数 (t/km <sup>2</sup> )	侵蚀量 (t)	占总量 (%)	侵蚀模数 (t/km <sup>2</sup> )	侵蚀量 (t)	占总量 (%)
农 地	坡耕地	1.016	28.18	12950.9	13158.1	33.46	29573.8	30047.0	30.81
	水平梯田	0.448	12.43	385.9	172.9	0.44	1213.3	543.6	0.56
	草粮带作	0.117	3.25	8366.0	978.8	2.49	20257.7	2370.1	2.43
	小 计	1.581	44.48	9051.1	14309.8	34.39	20848.0	32960.7	33.80
林 地	经济林	0.057	1.58	1543.7	88.0	0.22	4383.0	247.8	0.25
	乔灌木	0.228	6.32	1356.7	309.3	0.79	4444.2	1013.3	1.04
	小 计	0.285	8.02	1394.1	397.3	1.01	4421.4	1261.1	1.29
草 地	土质荒坡	1.434	39.78	15930.4	22844.2	58.09	40859.5	58592.5	60.07
	土石质荒坡	0.254	7.08	6984.3	1773.9	4.51	18568.6	4716.4	4.84
	小 计	1.688	47.50	14584.2	24617.8	62.60	37505.3	63308.9	64.91
全流域				10910.5	39324.9	100	27540.3	97530.7	100

注:全流域不包括水域和居民地面积0.051km<sup>2</sup>。

表9 小范家沟各地类的侵蚀量

土地利用				1988. 8. 4~6			1989. 7. 16		
类 别	面积 (km <sup>2</sup> )	占总面积 (%)		侵蚀模数 (t/km <sup>2</sup> )	侵蚀量 (t)	占总量 (%)	侵蚀模数 (t/km <sup>2</sup> )	侵蚀量 (t)	占总量 (%)
农地	坡式梯田	0.0036	1.98	1715.3	6.2	0.84	4260.3	15.3	1.07
林地	经济林	0.0172	9.47	1099.0	18.9	2.55	2107.6	36.3	2.54
	乔灌木	0.0456	25.11	503.4	22.9	3.09	919.2	41.9	2.94
	小 计	0.0628	34.58	665.6	41.8	5.63	1245.2	78.2	5.48
草地	封育草地	0.0316	17.40	4906.0	155.0	20.89	8957.0	283.0	19.84
	稀疏草灌	0.0820	45.15	6572.3	538.9	72.64	12807.2	1050.2	73.61
	小 计	0.1136	62.55	6108.2	693.9	93.53	11735.9	1333.2	93.45
水 域				0	0	0	0	0	0
全流域				4085.3	741.9	100	7856.3	1426.7	100

### 5.1 流域土壤侵蚀强度的空间分布特征

根据寺峪峁和小范家沟的侵蚀量计算结果和土壤侵蚀强度图(图略)可以看出,这两条支沟土壤侵蚀强度的空间分布状况有着根本的差异。在寺峪峁流域中,土壤侵蚀强度的空间变化主要是受梁峁沟壑地形垂直分异因素的控制。例如在1988年8月4~6日的两次暴雨中,流域总侵蚀模数为10 908t/km<sup>2</sup>。其中,1级(<1 000t/km<sup>2</sup>)和2级(1 000~2 500t/km<sup>2</sup>)侵蚀强度的分布,除了梯田和林地为主要外,则分布在分水岭,1、2级面积分别占流域面积的18.84%和3.2%;3级(2 500~5 000t/km<sup>2</sup>)主要分布在梁峁坡的上部,面积占10.5%;4级(5 000~10 000t/km<sup>2</sup>)主要分布在梁峁坡的中、下部和塌地向沟坡过渡的部位与土石质沟坡上,面积占16.5%;5级(10000~20000 t/km<sup>2</sup>)主要分布在梁峁坡下部和坡度较缓的沟坡下部,面积占31.6%;6级(20 000~30 000 t/km<sup>2</sup>)主要分布在沟谷坡的中上部,面积占18.79%;7级(30 000~40 000t/km<sup>2</sup>)主要分布在沟缘线附近的谷坡上,面积占0.52%。总的看来,流域内除了塌地和梯田与林地外,土壤侵蚀强度是从梁峁顶向沟坡逐渐增大的。这是黄土高原广大水土流失区自然状态的或初步治理的小流域侵蚀强度空间变化的基本特征。

小范家沟是纸坊沟流域治理的重点支沟之一。尽管该流域地形坡度的变化也遵循寺峪峁流域尤其是在它的上游地区所表现出的由梁峁顶向沟坡增大的同样规律,可是侵蚀强度并非从梁峁顶向沟坡逐渐增大,反而梁峁坡大于沟坡,并表现为与其治理有着密切关系的非垂直分带性的斑块状分布特征。小范家沟的沟坡林地面积占沟谷地面积的64.4%,其地面植被总覆盖度在60%以上,剩下的沟谷地是封育草地,植被覆盖度在50%左右。沟坡的这种良好的植被状况,使得侵蚀强度显著的减弱。梁峁坡主要为草灌带状间植,但柠条灌木林生长不良,植被稀疏,其保土效益差。因此,梁峁坡的侵蚀强度反比沟坡大。

### 5.2 流域侵蚀产沙来源的分析

首先,从不同的地貌部位侵蚀产沙看(见表7),寺峪峁流域的沟谷地侵蚀量和侵蚀模数均显著的大于沟间地。该流域的沟谷地面积占总面积的62.3%,沟间地占37.7%。在1989年7月16日的暴雨情况下,沟谷地和沟间地的侵蚀模数分别为30 824.7t/km<sup>2</sup>和20 836.6t/km<sup>2</sup>,沟谷地的侵蚀模数为沟间地的1.48倍,沟谷地侵蚀产沙量占总量的71.0%,沟间地占29.0%。1988年8月4~6日的两次降雨,沟谷地侵蚀模数为12 096.4t/km<sup>2</sup>,沟间地为9 006.0t/km<sup>2</sup>,沟谷地侵蚀产沙量占

68.9%,沟间地占31.1%。如果将沟谷地中的塌地除外,其余的沟谷地面积占流域面积的50.57%。按此计算,1988年8月4~6日的侵蚀产沙量占总量的67.5%;1989年7月16日的侵蚀产沙量占69.2%,沟坡侵蚀模数分别为沟间地的1.62倍与1.78倍。再者,从不同土地利用方式的侵蚀产沙来源(见表8)来看,沟间地的侵蚀产沙以坡耕地为主,沟谷地以土质荒坡为主。例如在1989年7月16日的降雨中,坡耕地的平均侵蚀模数为29 573.8t/km<sup>2</sup>,沟谷土质荒坡为40 589.5t/km<sup>2</sup>。坡耕地面积占流域面积的28.18%,侵蚀量占农地总侵蚀量的91.2%,占流域总量的30.81%。沟谷土质荒坡面积占流域面积的39.78%,侵蚀产沙量占沟谷总量的84.67%,占流域总量的60.1%。两者面积合占总面积68.0%,侵蚀产沙量占全流域的90.9%。以上分析充分说明了坡耕地和沟谷天然荒坡土壤侵蚀的严重性,以及它们在流域治理中所处的重要地位。

小范家沟的侵蚀产沙来源情况与寺峪峁大不相同,并主要来自于沟间地(见表7)。在1989年7月16日大暴雨的情况下,沟间地和沟谷地的侵蚀模数分别为10 717.7t/km<sup>2</sup>和4 123.8t/km<sup>2</sup>,两者的侵蚀产沙量分别占流域总量的77.22%和22.78%。再从不同土地利用方式(表9)来看,小范家沟的沟谷地主要为人工林地和封育草坡两种植被类型,面积分别占流域面积的25.11%和17.40%,侵蚀模数分别为919.2t/km<sup>2</sup>和8 957.0t/km<sup>2</sup>,侵蚀产沙量占流域总量的2.94%和19.84%;沟间地梁峁坡稀疏草灌地侵蚀模数为12 807.2t/km<sup>2</sup>,面积占沟间地面积的79.77%,占流域面积的45.15%,而侵蚀产沙量分别占沟间地和流域总侵蚀产沙量的95.38%和73.61%。显然,小范家沟治理沟的主要侵蚀产沙来源地与其地貌类型变化的关系不大,而与治理土地利用方式的关系密切。

综上所述,虽然寺峪峁和小范家沟同处于纸坊沟流域中,但由于影响侵蚀空间分异的主导因素的不同而造成了侵蚀产沙的主要来源有着较大的差别。在降雨因素相近的1989年7月16日的大暴雨情况下,寺峪峁流域及其沟谷地的侵蚀模数分别为小范家沟的3.44倍和7.47倍。这进一步说明小范家沟的治理,特别是沟谷造林、封育草坡增加地面植被覆盖,不仅使得侵蚀强度大大降低,而且打破了治理前由地形因素控制的侵蚀强度在流域内的垂直增强的分带性特征,从而抑制了坡度越陡侵蚀越严重,侵蚀越严重坡度越陡的恶性侵蚀演变发展过程。

### 5.3 计算成果检验

在本研究的两个小流域中,只有小范家沟沟口建有观测坝,有实测泥沙淤积量资料。表10为观测坝实测侵蚀量与模型计算侵蚀量的比较。由表10中可知,侵蚀模数的计算值较实测值相差2.2%和12.6%,这表明计算精度较高。

表10 小范家沟土壤侵蚀计算值与实测值的比较

降雨日期 (年.月.日)	侵蚀模数(t/km <sup>2</sup> )		相对误差(%)
	实测值	计算值	
1988.8.4~6	4674.2	4086.4	12.6
1989.7.16	8033.7	7856.5	2.2

另外,再与同期进行的1:200地面立体摄影测量结果相比较。布设在小范家沟沟坡上的测区面积为864.4m<sup>2</sup>,测得的1988年8月4~6日降雨侵蚀模数为2082t/km<sup>2</sup>,1989年7月16日降雨侵蚀模数为3 621t/km<sup>2</sup>,较模型计算的沟谷地侵蚀模数2 258.7t/km<sup>2</sup>和4 123.8t/km<sup>2</sup>,分别相差8.4%和13.8%。尽管这两种方法的观测与计算的面积大小不一样,但也在一定程度上说明沟坡侵蚀量

的计算值有较高的精度。

## 6 结 论

1. 研究表明,在地形复杂的黄土丘陵区,应用地理信息系统和土壤侵蚀模型相结合的方法,可以客观地对小流域土壤侵蚀的空间变化做出科学的定量评价和模拟,而且能模拟空间侵蚀动力—环境因素发生变化的侵蚀响应动态过程,使土壤侵蚀的评价结果更具有科学性和实用性。

2. 根据试验资料,分别建立了沟间地土壤侵蚀统计模型和沟谷地侵蚀概化模型。模型结构简单合理,考虑因素比较全面,使用方便。其中以径流小区资料为基础建立的包括植被和浅沟侵蚀影响的沟间地坡面侵蚀模型,可用于实际侵蚀量的计算。这是对坡面侵蚀建模的一个重要改进。

3. 在治理程度低的寺峪峁流域,土壤侵蚀强度的空间分异主要受梁峁沟壑地形因素的控制,而呈现出相应的垂直增强分带性特征;治理程度高的小范家沟,侵蚀强度大小的空间变化,与治理和土地利用的关系密切,而与地形变化的关系不大。

4. 根据几次典型暴雨侵蚀分析结果表明,寺峪峁流域的沟坡侵蚀模数为沟间地的1.62~1.78倍,沟谷地的侵蚀产沙量占流域总量的68.9%~71.0%。该流域的侵蚀产沙主要来源于沟谷地的土质天然荒坡,其中尤以沟缘线附近的谷坡侵蚀产沙最为严重;其次是坡耕地。两者面积合占流域的68.0%,侵蚀产沙量占90.9%~91.6%。小范家沟的侵蚀产沙主要来自于沟间地。在降雨因素相近的1989年7月16日的大暴雨情况下,寺峪峁流域及其沟谷地的侵蚀模数分别为小范家沟的3.44倍和7.47倍。这说明小范家沟的治理,特别是沟谷造林、封育草坡增加地面植被覆盖,起到了显著的削减水土流失的作用。

## 参考文献

- 1 Spanner, A. N., A. H. Strahler and J. E. Estes, Soil loss prediction in a geographic information system format. presented at the Seventeenth International Symposium on Remote Sensing of Environment, Michigan, 1983
- 2 De Roo, A. P. J., L. Hazelhoff and P. A. Burrough, Soil erosion modelling using ANSWERS and geographical information systems, *Earth Surface Processes and Landforms*, 517~532, 1989, 14
- 3 崔伟宏等. 在信息系统支持下黄土地区 PSL 模型的试验研究. 黄土高原遥感调查试验研究, 科学出版社, 1988年
- 4 马霄乃等. 柳河地区土壤侵蚀定量分析. 中国水土保持, 1990(1)。
- 5 李锐等. 黄土高原综合治理试验区航空遥感监测试验研究. 黄土高原区域治理与评价, 科学出版社, 1992年。
- 6 江忠善等. 降雨和地形因素与坡地水土流失关系的研究. 黄土高原小流域综合治理与发展. 科学技术文献出版社, 1992年
- 7 卢宗凡等. 黄土丘陵区水土保持生物耕作措施的研究. 水土保持学报, 1988(1)。
- 8 侯喜禄等. 陕北黄土丘陵沟壑区植被减沙效益研究. 水土保持通报, 1990(2)
- 9 江忠善等. 黄土高原综合治理试验示范区流域土壤侵蚀和综合治理减沙效益. 黄土高原区域治理与评价, 科学出版社, 1992年
- 10 陈浩. 降雨特征和上坡来水对产沙的综合影响. 水土保持学报, 1992(2)