

# 基于 GIS 的小流域水土流失遥感定量监测研究

刘耀林<sup>1,2</sup> 罗志军<sup>1,2</sup>

(1 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 武汉大学教育部地理信息系统重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘要:**以三峡库区典型小流域为研究区域,通过遥感和野外调查进行信息采集,建立了流域环境数据库;在 GIS 支持下,根据修正通用土壤流失方程(RUSLE)模型对数据库实施运算操作,探讨了流域内土壤侵蚀强度的空间分布规律,并估算了小流域水土流失量。

**关键词:**水土流失;地理信息系统;遥感定量监测;小流域

**中图法分类号:**P208;P237.9

目前,国内外在坡面侵蚀的动力过程等方面的研究已取得了较快的发展,建立了一些土壤侵蚀模型,并得到了较好的应用效果,如美国的通用土壤流失方程(USLE)<sup>[1]</sup>和修正的通用土壤流失方程(RUSLE)、中国的黄土高原次降雨侵蚀量模型和卜兆宏等人的“似 USLE”模型等。由于影响土壤侵蚀的动力——环境因素时空变化的复杂性,对流域侵蚀空间变化的定量研究进展缓慢。近年来,随着 GIS 技术和 RS 技术的迅速发展和广泛应用,采用土壤侵蚀模型和地理信息系统相结合的方法,使得土壤侵蚀空间变化的定量研究得到了加强和发展,并使土壤侵蚀研究有了一个新的发展方向。

本文以长江三峡库区典型小流域为研究区域,通过遥感影像和野外调查进行信息采集,在 GIS 支持下建立流域环境数据库,根据土壤流失监测模型对数据库实施运算操作,从而进行流域水土流失空间变化的定量评价和监测研究。

## 1 研究方法

研究区域选在湖北省宜昌太平溪小流域,距三峡坝址 5 km,  $30^{\circ}52' \sim 30^{\circ}58' N$ ,  $109^{\circ}57' \sim 110^{\circ}01' E$ 。流域总面积 26.136 km<sup>2</sup>,主河道长 9.75 km,直抵长江,沟床比降为 9%,海拔在 80~1321 m 之间,山体坡度陡峭,平均坡度为 24.7°,

平均坡长 977 m,是典型的山区小流域。

由于水土流失是发生在地表的过程,一些特殊的侵蚀退化标志(如地表裸露程度、地形地貌等)易于被遥感影像所记录,因此,RS 技术成为对水土流失进行动态监测的一种先进有效的技术手段。基于 GIS 的水土流失遥感定量监测法就是将 RS 与 GIS 相结合,利用 GIS 强大的空间数据组织分析运算能力,对以往调查方法的优点加以集成应用。它以定点观测研究发展起来的土壤流失定量评价模型为核心,将现势性强的遥感数据和非遥感数据相结合,经过各因子算式及监测模型的运算,逐个计算出各像元的年平均流失量,最终获得全区的流失总量。

## 2 基于 GIS 的土壤流失量监测

### 2.1 小流域环境数据库的建立

以太平溪 1989 年 1:1 万航测地形图为工作底图,结合流域的彩红外航片和地质图,在 2004 年对流域进行了实地调查。调查内容包括地形地貌、土壤类型、植被覆盖、土地利用方式、水土保持措施、土地种植制度等。在室内对图形数据和属性数据进行统一编码、标准化处理后,在 Arc/Info 软件和 Access 数据库管理系统支持下建立了研究区的流域环境数据库(见表 1)。图形数据与属性数据通过统一设计的地理编码实现相互连接。

表1 流域环境数据库及结构

Tab. 1 Environmental Database and Its Structure in Study Area

| 数据层名称  | 数据类型    | 数据层内容         |
|--------|---------|---------------|
| 土壤分布图  | 多边形     | 土壤类型空间分布      |
| 土地利用图  | 多边形     | 旱地、水田、林地、园地等  |
| TM 影像  | 网格      | 地物类型、植被覆盖度等信息 |
| DEM    | 网格      | 高程、坡度、坡向等信息   |
| 土壤属性数据 | DBF 数据库 | 土壤机械组成、有机质含量等 |
| 降雨属性数据 | DBF 数据库 | 降雨量、降雨强度、降雨历时 |

## 2.2 土壤流失量监测模型及因子计算

修正的通用土壤流失方程(RUSLE)<sup>[1]</sup>的表达式为:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

式中,  $A$  表示年平均土壤流失量;  $R$  表示降雨及径流因子;  $K$  表示土壤可蚀性因子;  $L$  表示坡长因子;  $S$  表示坡度因子;  $C$  表示植被与经营管理因子;  $P$  表示水土保持措施因子。

### 2.2.1 $R$ 因子的估算

$R$  是一项评价降雨引起的土壤分离和搬运的动力指标, 其经典算法是 Wischmeier 等提出的 EI<sub>30</sub>法<sup>[1]</sup>。由于需要详尽降雨时序的雨量 and 雨强资料, 该方法往往难以实现, 因此, Arnoldus 提出了一种计算  $R$  值的简便方法<sup>[2]</sup>:

$$R = (4.17 \times \text{MFI}) - 152$$

$$\text{MFI} = \sum P_i^2 / P$$

式中,  $P_i$  表示月降水量(mm);  $P$  表示年降水量(mm); MFI 表示修正的 Fournier 指数。

由于研究区面积小, 降雨分布比较均匀, 全流域只采用一个  $R$  值。根据太平溪水土保持试验站多年的降雨观测资料, 求得  $R = 4\ 969$  [MJ·mm/(ha·hr·a)]。

### 2.2.2 $K$ 因子的估算

$K$  是一项评价土壤被降雨侵蚀力分离、冲蚀和搬运难易程度的指标。对  $K$  值的计算主要有 Wischmeier 诺模图法<sup>[1]</sup>、Romkens 公式计算法<sup>[3]</sup>和柯克比查表法<sup>[4]</sup>等三种方法。基于土壤颗粒粒级的  $K$  值公式计算法(即  $K(D)$  法,  $D$  表示土壤颗粒的几何平均直径(mm))适用于细粒结构或粗粒结构的土壤(如粘土或砂土)。对于小于 10% 岩屑的土壤,  $K(D)$  的计算公式为:

$$K(D) = 0.003\ 5 +$$

$$0.038\ 8e^{-0.5 \times [( \lg D + 1.519 ) / 0.758\ 4]^2}$$

$$D = e^{0.01 \times \sum (f_i \times \ln m_i)}$$

式中,  $f_i$  表示第  $i$  级粒级组分的重量百分比;  $m_i$  表示第  $i$  级粒级组分限值的平均值。

利用湖北省第二次土壤普查资料, 收集研究区各种土壤类型的机械组成、粒级含量、有机质含量等数据, 根据其质地组成分别用  $K(D)$  法和查表法来计算  $K$  值。将每种土壤类型的  $K$  值作为属性数据输入数据库中, 最后以  $K$  值作为覆盖值生成  $K$  因子的栅格数据。

### 2.2.3 $LS$ 因子的估算

$LS$  因子是反映地形地貌特征对土壤侵蚀的影响。按照 Wischmeier 和 Smith 提出的程序, 应用改进的坡长因子算法<sup>[5]</sup>和坡度因子算法<sup>[6]</sup>来计算研究区每一个坡段的  $LS$  因子值。

由于目前坡长因子一般都是通过 DEM 计算得出的, 因此, 在实际工作中往往采用基于像元的坡长算法。如果将 DEM 的每一栅格定义为坡面的一个坡段, 则 Foster 和 Wischmeier 提出的不规则坡面每一坡段的  $L$  因子算法可写为<sup>[7]</sup>:

$$L_{ij} = \frac{\lambda_{ij}^{m_{ij}+1} - \lambda_{i,j}^{m_{ij}-1}}{(\lambda_j - \lambda_{i,j}) \times (22.13)^{m_{ij}}}$$

式中,  $L_{ij}$  表示第  $(i, j)$  像元的坡长因子;  $\lambda_{ij}$  表示由坡顶沿流水线到第  $(i, j)$  像元末端的距离(m);  $\lambda_{i,j}$  表示由坡顶沿流水线到第  $(i, j)$  像元上端的距离(m);  $m_{ij}$  表示第  $(i, j)$  像元的坡长指数。则 RUSLE 中任一坡面第  $(i, j)$  坡段的  $LS$  因子算法为:

$$L_{i,j} S_{i,j} = \frac{S_{i,j} \times (\lambda_{ij}^{m_{ij}+1} - \lambda_{i,j}^{m_{ij}-1})}{(\lambda_j - \lambda_{i,j}) \times (22.13)^{m_{ij}}}$$

利用 Arc/Info 软件将水系图配准在 DEM 图上, 运行  $LS$  算法, 输入配置了水系的数字高程模型文件, 可生成  $LS$  因子的栅格数据。

### 2.2.4 $CP$ 因子的估算

$CP$  因子作为侵蚀动力的抑制因子, 主要反映了植被或作物以及管理措施对土壤流失量的影响。 $C$  和  $P$  值均在 0~1 之间变化, 对于  $C$  而言, 基本没有土壤侵蚀危险的地区被赋予 0; 1 值被赋给那些最容易受到侵蚀的地区, 如裸地; 而对于  $P$  而言, 0 值代表无侵蚀地区; 1 值则用于表示未采取任何水保措施的地区。

对于太平溪研究区, 根据野外调查和土地利用现状图, 采用最大似然法对研究区 1999 年 9 月 1 日的 TM 卫星影像进行分类处理, 结果生成有水体、居民地、水田、旱地、林地、疏林地、园地、荒地和裸岩等 9 种覆盖类型的土地覆盖图, 然后对每种土地利用类型的年平均  $C$  因子值进行估算(见表 2)。

流域内的水土保持措施主要有等高带状耕作、等高沟垄耕作和修筑梯田。根据流域内设置的试验小区资料和文献[1], 确定流域主要水土保持措

施的  $P$  值(见表 3)。把  $C$  和  $P$  值分别赋给相应的每种地物类型, 生成  $C$  和  $P$  值的栅格数据, 获得  $C$  和  $P$  因子值的空间分布图。

表 2 流域内不同土地利用类型对应的  $C$  值

Tab. 2  $C$  Values for Various Land Use Classifications in the Study Area

| 土地覆盖类型 | $C$ 值 | 土地覆盖类型 | $C$ 值 |
|--------|-------|--------|-------|
| 水体     | 0     | 荒地     | 0.019 |
| 居民地    | 0.08  | 园地     | 0.10  |
| 水田     | 0.18  | 荒地     | 0.21  |
| 旱地     | 0.46  | 疏裸岩    | 1.00  |
| 林地     | 0.005 |        |       |

表 3 不同坡度和水土保持措施下的  $P$  值

Tab. 3  $P$  Values for Various Support Practice Factors

| 坡度/ $^{\circ}$ | 顺坡耕作 | 等高带状耕作 | 等高沟垄种植 | 梯田   |
|----------------|------|--------|--------|------|
| 2.0~ 5.0       | 1.00 | 0.50   | 0.30   | 0.10 |
| 5.1~ 9.0       | 1.00 | 0.70   | 0.40   | 0.16 |
| 9.1~ 16.0      | 1.00 | 0.90   | 0.50   | 0.30 |
| 16.1~ 20.0     | 1.00 | 1.00   | 0.70   | 0.40 |
| 20.1~ 25.0     | 1.00 | 1.00   | 0.90   | 0.55 |

### 2.3 流域土壤流失量的计算

结合 GIS 强的大空间运算能力, 可计算研究区每个像元的土壤流失量。

从土壤侵蚀环境数据库中读取按上述计算或赋值后储存的因子值图, 这些因子值图处在同一坐标系统, 由同样大小的栅格所组成, 每幅图就有一套因子值。利用 Arc/Info 软件的空间分析模块, 执行叠置功能, 将各因子连乘, 最后得像元土壤流失量图。在像元土壤侵蚀模数图的基础上, 根据水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》确定土壤侵蚀强度分级指标, 对像元侵蚀量进行分类, 将侵蚀量在同一侵蚀等级的像元进行归并, 进而绘制出小流域土壤侵蚀强度图(如图 1)。

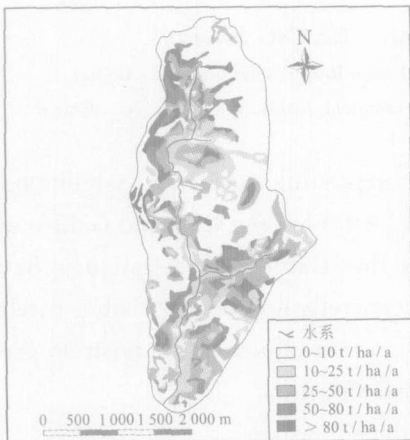


图 1 太平溪小流域土壤侵蚀强度空间分布图  
Fig. 1 Map Showing General Distribution of Soil Erosion in Taipingxi Watershed

## 3 结果与讨论

### 3.1 应用结果

对像元土壤侵蚀量图和土壤侵蚀等级图进行统计, 结果表明, 太平溪小流域年平均侵蚀模数为  $3\ 027\ \text{t}/\text{km}^2$ , 侵蚀强度属于中度, 由山丘高地流入水域的土壤年流失总量为  $79\ 096\ \text{t}$ ; 占流域面积  $62.18\%$  的区域, 土壤侵蚀强度为轻度, 这一区域对流域土壤侵蚀量的贡献率仅为  $3.49\%$ , 而流域  $61.55\%$  的泥沙来自于占流域面积仅  $10.62\%$  的极强度和剧烈侵蚀区域(表 4)。

表 4 土壤侵蚀等级面积统计结果

Tab. 4 Statistical Results About the Area for Various Grade of Soil Erosion

| 侵蚀级别 | 侵蚀面积/ $\text{km}^2$ | 百分比/ $\%$ | 侵蚀总量/ $\text{t}$ | 百分比/ $\%$ |
|------|---------------------|-----------|------------------|-----------|
| 微度   | 12.32               | 47.15     | 586              | 0.74      |
| 轻度   | 3.93                | 15.03     | 2 177            | 2.75      |
| 中度   | 5.26                | 20.12     | 15 929           | 20.14     |
| 强度   | 1.85                | 7.08      | 11 721           | 14.82     |
| 极强度  | 1.25                | 4.79      | 15 613           | 19.74     |
| 剧烈   | 1.52                | 5.83      | 33 070           | 41.81     |

### 3.2 讨论

1) 为了防止流域水土流失, 必须采取合理有效的防治措施。如果将强度以上的土壤侵蚀区域减少到中度侵蚀, 则流域泥沙可减少  $4.64 \times 10^4\ \text{t}$ , 侵蚀模数下降到  $1\ 251\ \text{t}/\text{km}^2$ , 侵蚀强度下降一个等级。因此, 现在流域治理的重点应是面积占  $17.7\%$  的土壤流失强度区。植被覆盖度的增加和坡耕地、裸地面积的减少是降低侵蚀强度与减少流失量的主要途径, 常用的减少水土流失的方法有植树造林和坡改梯两种。

2) 基于 GIS 的遥感定量监测结果要比定性遥感结果准确和表示的图斑细, 它不仅在水土保持的科学管理中有更大的实用价值, 而且对农林水的可持续发展规划都有应用价值。

### 参 考 文 献

[1] Shi Zhihua, Cai Chongfa, Ding Shuwen, et al. Soil Conservation Planning at the Small Watershed Level Using RUSLE with GIS: a Case Study in the Three Gorge Area of China [J]. Catena, 2004, 55( 1 ): 33-48

[2] Arnoldus H M J. An Approximation of the Rainfall Factor in the Universal Soil loss Equation [M]. De Boodt: Gabriele, 1980

[3] Romkens M J M, Prasad S N, Poesen J M A. Soil

- Erodibility and Properties [C]. Transactions of the 13th Congress of the International Society of Soil Science, Hamburg, 1986
- [4] 柯克比 M J, 摩根 R P C. 土壤侵蚀[M]. 王礼先译. 北京:水利电力出版社, 1987
- [5] McCool D K, Foster G R, Mutchler C K, et al. Revised Slope Length Factor for the Universal Soil Loss Equation [J]. Transactions of the Am. Soc. of Agric. Engrs., 1989, 32 (5): 1 570-1 576
- [6] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised Slope Steepness Factor for the Universal Soil Loss Equation [J]. Transactions of the Am. Soc. of Agric. Engrs., 1987, 30 (5): 1 388-1 396
- [7] Desmet P J, Govers G. A GIS-procedure for the Automated Calculation of the USLE LS-factor on Topographically Complex Landscape Units [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 51: 427-433

第一作者简介: 刘耀林, 教授, 博士生导师。现从事地理信息系统理论、方法和应用研究。

E-mail: yaolin610@163.com

## Study on Quantitative Monitoring Soil Loss in Small Watershed Base on GIS and RS

LIU Yaolin<sup>1,2</sup> LUO Zhijun<sup>1,2</sup>

(1 School of Resource and Environment Science, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Key Laboratory of Geographic Information System, Ministry of Education, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** A quantitative method of RS for monitoring soil losses based on GIS and the formula and algorithm of each model factor about the revised universal soil loss equation (RUSLE) are described in this paper, the spatial distribution law of soil erosion is discussed and the amount of soil loss of the small watershed is predicted running the model of RUSLE by the support of GIS.

**Key words:** soil loss; GIS; quantitative monitoring of RS; small watershed

**About the first author:** LIU Yaolin, professor, Ph. D supervisor. He is engaged in the research on the theory, method and application of GIS.  
E-mail: yaolin610@163.com

(上接第 11 页)

## DOP for GPS, Galileo and Combination Navigation System

WANG Zemin<sup>1</sup> MENG Yang<sup>1</sup> WU Yue<sup>1</sup> LIANG Shujun<sup>2</sup>

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 General Research Institute of Metallurgy and Investigation, 13 Dongfeng Road, Baoding 071000, China)

**Abstract:** This paper uses the Galileo orbit parameter for simulating the Galileo satellite position and DOP, compares the visible satellite number and DOP between GPS and Galileo system, at same time and same place. The result indicates that Galileo constellation is better than GPS. And simulates GPS and Galileo combined constellation, more visible satellite brings diminished DOP, in contrast with single system, so that improves the position precision, and also broaden the scope of position due to limited elevation.

**Key words:** GPS; Galileo; number of visible satellite; combined system

**About the first author:** WANG Zemin, professor, Ph. D supervisor. His major research interests are geodesy and geodynamics.

E-mail: zmwang@sgg.wtustm.edu.cn