

# 基于 GIS 和 RU SLE 的小流域农地水土保持规划研究

史志华, 蔡崇法, 丁树文, 李朝霞, 王天巍

(华中农业大学)

**摘要:** 通过遥感和野外调查进行信息采集, 利用修正通用土壤流失方程(RU SLE)和 DR ISI 地理信息系统进行数据分析, 获取了王家桥小流域土壤侵蚀的时空分布信息。根据土壤经济容许流失量( $T_{EP}$ )和水土保持规划原则, 调整现有农地的利用方式或配置水土保持措施, 即调整RU SLE中植被与经营管理因子(C)和水土保持措施因子(P)的值, 完成流域农用地的水土保持规划。该研究提出的以RU SLE与GIS相耦合的水土保持规划工具比较简单实用。

**关键词:** 水土流失通用方程(RU SLE); 水土保持规划; 地理信息系统(GIS)

**中图分类号:** S157; TP75

**文献标识码:** A

**文章编号:** 100226819(2002)0420172204

水土流失及其导致的土地退化是生态环境恶化的重要原因之一。小流域是水土流失发生和发展的最基本单元, 小流域水土保持规划内容主要包括水土保持措施布设, 田间工程设计, 土地利用结构的调整。由于水土流失发生具动态的、随机的特点以及规划工作中涉及大量的空间信息, 需要强有力的空间规划决策支持工具, 本文在 DR ISI 地理信息系统支持下, 通过RU SLE预测不同水土保持措施与土地利用结构调整对土壤侵蚀量的影响, 以期小流域农地水土保持规划提供借鉴。

## 1 研究小流域概况

研究小流域选在湖北省秭归县王家桥小流域, 属于长江的二级支流流域, 面积  $16.7 \text{ km}^2$ , 海拔在  $184 \sim 1180 \text{ m}$  之间, 坡度陡峭, 属典型山区小流域。气候属中亚热带大陆性季风气候, 年平均温度  $14.5 \sim 18.0$ , 降水量  $1100 \text{ mm}$  左右, 集中性暴雨易造成山洪灾害。农作物以小麦、玉米、水稻、红苕、马铃薯为主; 柑桔是本区的主产果品。

## 2 研究方法

本研究通过遥感和野外调查进行信息采集, 利用RU SLE和 DR ISI32 地理信息系统分析土壤侵蚀的时空分布信息。然后根据土壤容许流失量和水土保持规划的原则, 调整利用方式或配置水土保持措施, 即RU SLE中的C和P值, 工作流程如图1。

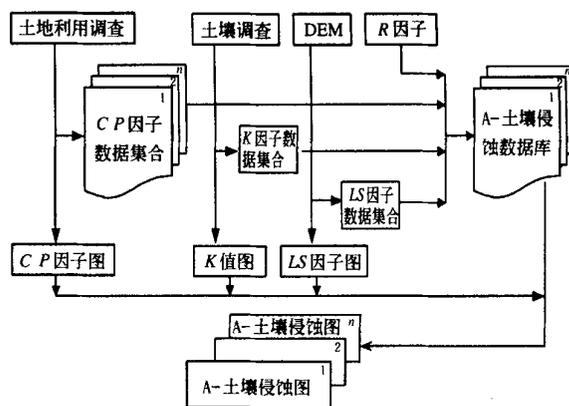


图 1 基于 GIS 和 RU SLE 的水土保持规划流程图

Fig 1 Flow chart of procedures used for water and soil conservation planning using GIS based RU SLE

## 2.1 流域空间数据库建立

以该流域 1993 年航片为工作底图, 结合流域地形图、地质图, 在 1996 年对流域进行了详查。调查内容包括土壤、土地利用、水土保持措施、地块的经济产量及 1991 至 1995 年的土地种植制度等。在室内对图形和属性数据进行统一的编码、标准化处理后,

表 1 研究区环境数据库及结构

Table 1 Environmental database and its structure in study area

数据层名称	数据类型	数据层内容	说明
土地利用图	多边形	旱地、水田、菜地、园地等	
土壤图	多边形	研究区内所涉及的土种	
地块图	多边形	由利用和土地所有权确定	
DEM	网格	数字化等高线内插得到, 网格中纪录该点高程	衍生 LS 图
土壤属性数据	DBF 数据库	纪录多项土壤性质, 如养分、有机质成分、含量等	
地块属性数据	DBF 数据库	地块种植制度、水保措施、坡度和产量水平等	

收稿日期: 2002201223

基金项目: 国家“十五”重点科技攻关项目(2001BA508B13); 973 项目(G1999011801)资助

作者简介: 史志华, 男, 讲师, 主要从事水土资源保护与地理信息系统应用的教学和研究工作。武汉 华中农业大学资源与环境系, 430070

在 DR ISB2 地理信息系统软件和 ACCESS 数据库管理系统支持下建立了研究区的流域空间数据库(表 1)。输入输出设备采用 Calcomp A<sub>0</sub> 幅面数字化仪、扫描仪和绘图仪。空间与属性数据通过统一设计的地理编码实现相互连结。

2.2 土壤侵蚀量的估算

水土保持规划, 需要对不同条件与状态下的土壤侵蚀进行预测, 经验模型在水土保持规划中扮演着重要角色<sup>[1-3]</sup>。通用土壤流失方程(U SLE)是使用最为广泛的经验模型<sup>[1,2]</sup>。最近 RU SLE 对 U SLE 从技术性和确定因子的算法进行了改进<sup>[4]</sup>, 使得 RU SLE 具有更广泛的应用范围, 预测精度更高, 其表达式为

$$A = R_1 K_1 L_1 S_1 C_1 P \quad (1)$$

式中  $A$  —— 年土壤流失量, t/(hm<sup>2</sup>·a);  $R$  —— 降雨和径流因子, MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a);  $K$  —— 土壤可蚀性因子, t·hm<sup>2</sup>/(h·MJ·mm);  $L$  和  $S$  —— 分别为坡长、坡度因子;  $C$  —— 植被与经营管理因子;  $P$  —— 水土保持措施因子。许多研究者认为应修改模型中有关因子算法使其适用于不同自然条件<sup>[2,3,5,8]</sup>。

2.2.1 L S 因子估算

$L$ 、 $S$  因子是反映地形地貌特征对土壤侵蚀的影响。验证通用方程的上限坡度为 18%<sup>[6]</sup>, 而王家桥流域有 76% 地方的坡度大于 30%。刘宝元等<sup>[2,3]</sup>根据天水、安塞、绥德 3 个试验站的径流小区资料建立了陡坡地条件下坡长 ( $L$ ) 和坡度 ( $S$ ) 因子的算法, 即

$$L = (K \cdot 22.13)^{0.44} \quad (2)$$

$$\text{和 } S = 21.91 \sin H - 0.96 \quad (3)$$

式中  $K$  —— 坡长, m;  $H$  —— 坡度角, (°)。

Nearing<sup>[5]</sup>通过综合 RU SLE 的  $S$  因子算法和刘宝元的  $S$  因子算法, 提出以下连续公式

$$S = -1.5 + \frac{17}{(1 + e^{2.3 - 0.61 \sin H})} \quad (4)$$

本研究的坡长 ( $L$ ) 和坡度 ( $S$ ) 因子算法分别采用刘宝元和李宁的算法。在 DR ISI 中计算  $L$  因子是采用 Desmet 和 Govers 提出的将 DEM 的每一栅格定义为坡面的一个坡段, 以单位等高线长的上坡来水面积取代 U SLE 或 RU SLE 中坡长定义<sup>[1]</sup>, 则 Foster 和 Wischmeier<sup>[7]</sup>提出的不规则坡面每一坡段的  $L$  因子算法可写为<sup>[1]</sup>

$$L_{i,j} = \frac{A_{i,j-out}^{m+1} + A_{i,j-in}^{m+1}}{(A_{i,j-out} - A_{i,j-in}) (22.13)^m} \quad (5)$$

式中  $L_{(i,j)}$  —— 坐标为 ( $i, j$ ) 像元的坡长因子;  $A_{(i,j-out)}$  —— 坐标为 ( $i, j$ ) 像元上坡来水流出该像

元时累积面积;  $A_{(i,j-out)}$  —— 坐标为 ( $i, j$ ) 像元上坡来水流入该像元时累积面积;  $m$  —— U SLE 的坡长指数, 但在这里当坡度大于 5% 时  $m$  为 0.44。式 (4) 和 (5) 相乘即为  $LS$  因子。

2.2.2 土壤可蚀性 K 值估算

$K$  值估算常用的方法是 Wischmeier 诺谟图<sup>[4]</sup>。但并不适合我国亚热带大多数土壤, 包括紫色土<sup>[8]</sup>。因此, 本文采用 RU SLE 推荐的在缺少资料时采用土壤颗粒的几何平均直径计算  $K$  值的方法

$$K = 7.594 \{ 0.0034 + 0.0405 \exp[-\frac{1}{2}((\log D_g + 1.659) - 0.7101)^2] \} \quad (6)$$

式中  $D_g$  —— 土壤颗粒的几何平均直径, mm, 计算公式如下

$$D_g = \exp(0.01 \sum f_i \ln m_i) \quad (7)$$

式中  $m_i$  —— 不同组  $i$  下的土壤颗粒粒径, mm;  $f_i$  —— 在  $m_i$  粒径下的质量分数。

2.2.3 降雨侵蚀力 R 值计算

根据秭归县水土保持实验站多年的降雨观测资料, 采用  $R = EI_{30} \cdot 100$ , 进行估算。由于流域面积小, 降雨分布比较均匀, 全流域只采用一个  $R$  值, 即  $R = 2880 \text{ MJ} \cdot \text{mm} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 。

2.2.4 作物经营管理因子 C 值和水土保持措施 P 值获取

$C$  值为实际植被状态和经营管理条件下土壤流失量与裸露连续休闲地的土壤流失量之比。根据流域轮作制度的调查资料和相关文献<sup>[4]</sup>, 流域不同农地轮作制度的  $C$  值(表 2)。由 1991~1995 年的轮作历史确定每一地块轮作制度而得到其  $C$  值, 并将其赋值给地块图。

表 2 流域内常见轮作制度的 C 值

Table 2 C values for common crop rotations in studied area

轮作制度	C 值	轮作制度	C 值	轮作制度	C 值
水稻	0.10	小麦	0.48	绿肥	0.06
油菜	0.46	果园	0.18	油菜-水稻	0.08
玉米	0.36	红苕	0.42	小麦-玉米	0.28
马铃薯	0.41	油菜-玉米	0.26	玉米-黄豆间作	0.20
黄豆	0.38	油菜-玉米-绿肥	0.12	小麦-玉米-绿肥	0.15

表 3 不同水土保持措施 P 值

Table 3 P values for various support practice factors

坡度 (°)	顺坡耕作	等高沟垄种植	等高带状耕作	水平梯田
2.0~5.0	1.00	0.30	0.50	0.10
5.1~9.0	1.00	0.40	0.70	0.16
9.1~16.0	1.00	0.50	0.90	0.30
16.1~20.0	1.00	0.70	1.00	0.40
20.1~25.0	1.00	0.90	1.00	0.50

在流域内的水土保持措施主要有等高沟垄耕作、等高带状耕作和水平梯田。参照美国农业部农业手册 703 号和流域内设置的径流小区资料确定流域主要水土保持措施的  $P$  值(表 3)。并将  $P$  值赋值给地块图, 获取  $P$  因子的空间分布数据。

### 2.3 土壤容许流失量

土壤容许流失量 ( $T$ ) 是指土地在长时期内能保证经济地维持高水平作物产量条件下的最大土壤流失量<sup>[4]</sup>。根据水利部土壤侵蚀分级分类标准<sup>[9]</sup>, 三峡地区的土壤容许流失量是  $5 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。从经济观点看, 技术的发展和更加适宜的土地管理常常可以允许土壤侵蚀率超过土壤容许流失量<sup>[4]</sup>。因此本研究中土壤容许流失量用土壤经济容许流失量代替, 表示为  $T_{EP}$ 。根据流域自然条件,  $T_{EP}$  设为  $10 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

RU SLE 指导水土保持措施配置决策时, 根据作物制度、经营管理水平、水土保持措施等方面几种可供选择的组合, 预报土壤侵蚀率, 与土壤允许流失量值相比, 得出在给定界限内控制侵蚀的具体方案。任何土壤侵蚀率小于允许值的耕作和经营管理措施的组合, 都能比较满意地控制侵蚀。

### 3 结果与讨论

RU SLE 模型各因子专题图层在 DR ISI 中通过叠加就可计算每个像元的土壤流失量。在现实条件下的土壤流失量按  $T_{EP}$  分为 4 级: 微度 ( $< T_{EP}$ )、轻度 ( $T_{EP} \sim 2T_{EP}$ )、中度 ( $2T_{EP} \sim 4T_{EP}$ ) 和强度 ( $> 4T_{EP}$ )。在  $790 \text{ hm}^2$  的农用地中, 有 32.7% 的属于微度, 19.4% 属于轻度, 28.2% 属于中度, 19.7% 属于强度。农用地的年平均土壤流失量为  $21.0 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

在  $532 \text{ hm}^2$  侵蚀强度大于  $T_{EP}$  的农用地中有  $38 \text{ hm}^2$  的土地坡度超过  $25^\circ$ ; 侵蚀多为强度。应该退耕还林或草。改变轮作制度可以使 9% 面积的侵蚀强度小于  $T_{EP}$ ; 等高带状耕作和等高沟垄种植可以分别使 31% 和 70% 面积的土壤侵蚀量小于  $T_{EP}$ ; 如果采用改变轮作、等高带状耕作、等高沟垄种植和修建梯田等综合措施则可使 91% 的农用地土壤侵蚀强度小于  $T_{EP}$  (图 2)。

实际规划时主要考虑了农民的可接受程度、资金的投入、利用现状和保土效果等方面。当坡度小于 15 时以改为间作、套种或混种为主; 坡度较大时, 改粮食生产为  $C$  值较小的如绿肥、牧草等, 但综合经济效益减少要小于 25%。等高带状耕作和等高沟垄种植要做好坡面蓄排水工程, 保证措施安全。规划方案措施包括改变轮作制度 ( $40 \text{ hm}^2$ )、等高带状耕作

( $93 \text{ hm}^2$ )、等高沟垄种植 ( $141 \text{ hm}^2$ ) 和修建梯田 ( $124 \text{ hm}^2$ ) (图 3)。剩余 6.1% 农用地主要是分布于沟坡的边缘, 最好是退耕还林。

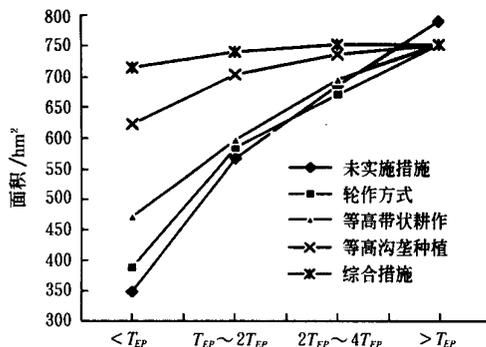


图 2 不同水土保持措施对减少流失面积的累计曲线图  
Fig 2 Cumulative curves for impact of different erosion controlling techniques on soil loss area

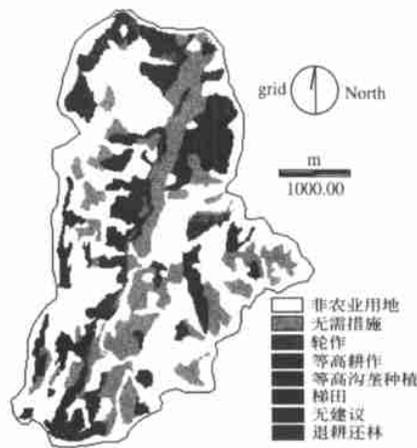


图 3 王家桥小流域水土保持规划图  
Fig 3 Map showing of soil conservation practices in Wangjiaqiao Watershed

利用 GIS 与 RU SLE 模型进行水土保持规划的关键是土壤侵蚀预测是否准确。在现实条件下, 预测的农用地平均侵蚀量为  $21.0 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。根据秭归县水土保持实验站的观测资料, 流域多年的平均土壤流失量大约为  $16.5 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , 考虑到林地的流失量低和其它因素, 认为用修正后的 RU SLE 预测的土壤流失量是比较符合实际。在实际规划中将土壤侵蚀分为 4 级后, 更可以消除部分偏差; 更何况多数研究表明: RU SLE 预测土壤流失量时, 土壤侵蚀强度越低预测越准<sup>[10]</sup>, 而侵蚀强度较高的又正是水土保持措施规划的重点, 所以规划的成果是可信的。

### 4 结 语

首先, GIS 作为流域水土保持规划的前处理, 可获得相当精度的基于空间地理定位的输入; 作为后处理, 使结果可视化, 使规划前后流域土壤侵蚀量的

时空特征清晰表现, 有利于规划方案的确定。

其次, 利用地理信息系统进行水土保持规划, 可以是定量、定位和动态的, 克服了传统规划方法以及对效益的分析大多是定性的、半定位的和静态的特点。

#### [参 考 文 献]

- [1] Desmet P J, Govers G A. 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 (5): 427~433
- [2] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes [J]. *Trans of the ASAE*, 1994, 37: 1835~ 1840
- [3] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes [J]. *Soil Science Society of America Journal* 2000, 64: 1759~ 1763
- [4] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. Handbook No. 703 U. S., 1997. Department of Agriculture, Washington D. C.
- [5] Nearing M A. A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss [J]. *Soil Science Society of America Journal* 1997, 61(3): 917~ 919
- [6] McCool D K, Foster G R, Murchler C K, et al. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation [J]. *Trans of the ASAE*, 1989, 32: 1571~ 1576
- [7] Foster G R, Wischmeier W H. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction [J]. *Trans of the ASAE*, 1974, 17: 305~ 309
- [8] 史学正, 于东升, 邢延炎. 用田间实测法研究我国亚热带土壤的可蚀性 K 值 [J]. *土壤学报*, 1997, 34(4): 399~ 405
- [9] 水利部标准. 土壤侵蚀分类分级标准 (SL 190296) [S]. 北京: 水利电力出版社, 1997.
- [10] Nearing M A. Why soil erosion models overpredict small soil losses and underpredict large soil losses [J]. *Catena*, 1998, 32: 15~ 22

## Soil Conservation Planning at Small Watershed Level Using GIS-Based Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)

Shi Zhihua, Cai Chongfa, Ding Shuwen, Li Zhaoxia, Wang Tianwei

(Department of Resource and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Through data obtained from remote sensing and field surveys, the geographic information system (GIS) was used to develop conservation-oriented watershed management strategies on Wangjiaqiao Watershed. The Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) combined with DRISIGIS software was applied to evaluate agricultural management strategies in terms of soil loss at the watershed. GIS allowed for easy assessment of the relative erosion hazard over the watershed under different land management options. The presented RUSLE-GIS model provides a robust soil conservation planning tool readily transferable and accessible to other land managements.

**Key words:** RUSLE; soil and water conservation planning; geographic information system