

# 浅谈水土流失遥感定量模型及其因子算法<sup>\*</sup>

周 斌

(中国科学院地球化学研究所, 贵阳, 550002)

**摘 要** 基于地理信息系统的遥感定量调查法是近年来新出现的水土流失调查方法, 其核心部分就在于水土流失定量评价模型及其各参数的算式算法。本文主要介绍了几种主要的水土流失遥感定量评价模型的构成, 并对其中 USLE 系列模型的因子的算式、算法进行了汇编。

**关键词** 水土流失 遥感 地理信息系统 定量监测模型 模型因子算法

**作者简介** 周 斌 男 1972 年生 博士研究生 主要从事环境遥感与地理信息系统应用研究

水土流失是复杂的人文和地理过程, 受到诸如降水、下垫面基底岩性、地形坡度、土地覆盖类型及管理方式等众多因素的影响。其调查方法主要有工程实验法、定性遥感法和基于地理信息系统(GIS)的遥感定量法<sup>1~3</sup>。其中, 基于 GIS 的遥感定量法是近年来随着 GIS 的迅速发展才得以出现的水土流失调查新方法, 由于它突破了传统调查方法在多源信息的“整体分析”上所存在的技术瓶颈, 因此该方法为快速、准确地获取土壤侵蚀和土地退化方面的深加工信息提供了技术保障。

## 1 基本原理及方法

基于 GIS 的水土流失遥感定量监测法主要是利用 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出来的侵蚀定量评价模型为核心, 结合不同来源的各控制因子资料, 如遥感提供的侵蚀退化信息、航测地形图、降雨观测数据、土壤普查和土地利用/土地覆盖资料等, 经过各因子算式及监测模型运算, 逐个计算出各像元的年均流失量, 最终获得全区的流失总量(图 1)。

## 2 水土流失定量评价模型

作为定量调查方法的核心, 侵蚀量定量评价模型经历了数十年的发展历程。早期的土壤流失量估算基本上是定性的, 之后提出了一些用单一的独立变量描述土壤流失量的方程式, 这些单因

子方程式是为其它因子近似地等于常量的局部条件而设计的。由于积累了更多的可以应用的资料, 于是多因子侵蚀定量模型应运而生, 并且每一个对土壤侵蚀发生影响的因子都能够被较好地描述<sup>4</sup>。

根据建模方法, 这些土壤侵蚀定量模型基本上可以分为两类: ①经验统计模型; ②物理模型。下面分别介绍这两类模型的有关情况。

### 2.1 经验统计模型

经验统计模型是根据标准小区实测结果, 确定土壤侵蚀的控制因素并拟合出能最大概率地重现观测数据的函数对应关系式。该方法基本上不考虑土壤侵蚀过程的内部机制, 因此又被称为黑箱模型。这类模型主要有 USLE、RUSLE、卜兆宏模型和我国的黄土高原模型等。

#### 2.1.1 黄土高原模型(次降雨侵蚀量模型)<sup>5</sup>

江忠善等通过在黄土高原的试验得出了次降雨无植被裸露坡耕地和人工草地的侵蚀量多元幂函数统计模型。如次降雨人工草地侵蚀模型为:

$$M = 0.258 (PI_{30})^{1.651} S^{0.949} L^{0.247} e^{-0.0399c}$$

式中,  $M$  ——次降雨土壤侵蚀模数 ( $t/km^2$ );  $P$  ——降雨量 (mm);  $I_{30}$  ——最大 30 分钟雨强 (mm);  $S$  ——坡度 ( $^{\circ}$ );  $L$  ——坡长 (m);  $e$  ——雨量动能;  $c$  ——植被覆盖度 (%)。

1999年4月27日收稿, 9月7日改回。

\* 贵州省科学技术基金资助项目(黔基合计字 993095 号)。

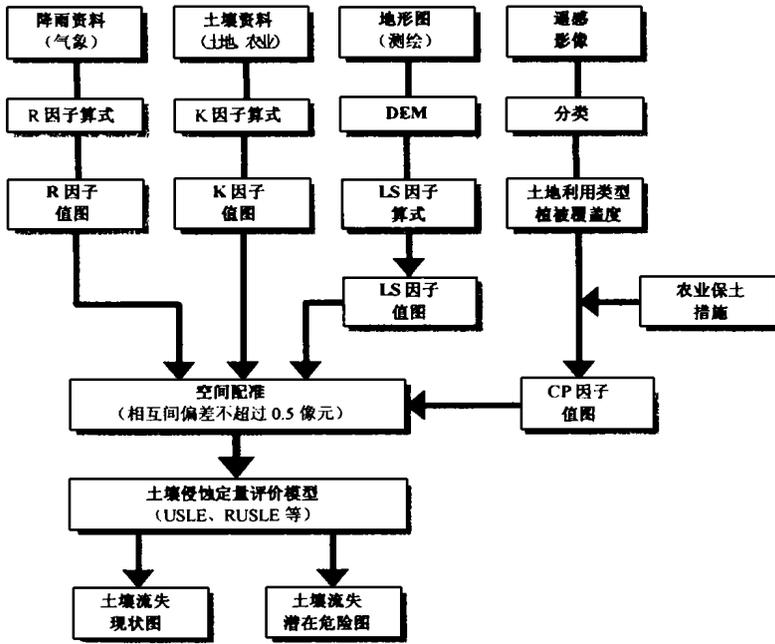


图 1 基于 GIS 的水土流失遥感定量评价流程图

Fig. 1. Flow chart of quantitative remote-sensing assessment of water erosion on the basis of GIS data.

由于是基于降雨事件的侵蚀模型, 因此, 该模型有望通过使用动态的降雨、植被覆盖度、土壤性质、地形和管理措施信息来生成侵蚀预测的长期序列, 从而进一步准确地计算出长期侵蚀率。其中, 植被覆盖度信息一般可通过遥感技术来获取。

遗憾的是, 该模型目前仍缺乏有关其推广应用的验证报道。此外, 也需要针对所有的土地覆盖类型提出侵蚀模型。

### 2.1.2 USLE 系列模型 (多年平均侵蚀量模型)

该系列模型是为显示长期年平均侵蚀速率而设计的, 主要包括 USLE<sup>[6,7]</sup> (通用土壤流失方程)、RUSLE<sup>[8,9]</sup> (修正的通用土壤流失方程) 和卜兆宏等的模型<sup>[1,2]</sup>。它们均采用相同的模型结构, 更确切地讲, 后者是在 USLE 方程的基础上发展起来的。

USLE 系列模型的数学表达式为:

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

式中,  $A$  ——土壤流失量 ( $t/ha \cdot a$ );  $R$  ——降雨侵蚀力因子 ( $MJ \cdot mm/ha \cdot hr \cdot a$ );  $K$  ——土壤可蚀性因子 ( $t \cdot ha \cdot hr/ha \cdot MJ \cdot mm$ );  $L$  ——坡长因子;  $S$  ——坡度因子;  $C$  ——作物经营管理因子;  $P$  ——土壤侵蚀控制措施因子。

USLE 是 D. D. Smith 和 W. H. Wischmeier 把从美国 21 个州 36 个地区所获得的 8000 多个小区一年的土壤侵蚀研究资料进行汇编, 并对各种影响土壤流失量的因子进行了重新评价后所导出

的土壤流失方程式。由于它不受局部地理、气候因素的限制而能广泛应用, 故称为“通用方程”。

RUSLE 包含了近期研究的附加数据和 USLE 中所含数据的修正版, 对 USLE 作了包括技术性的和因子值算式的改进, 因此在土壤流失预测中具有更高的准确度<sup>[9]</sup>, 且代表了当今最好的预测土壤侵蚀技术<sup>[10]</sup>。

卜兆宏等 (1997)<sup>[1]</sup> 对 USLE 进行了一系列的中国本地化应用研究。虽然采用的监测模型与 USLE 具有相同的表达式, 但其因子算式、算法系由我国实测资料所建, 因此据称更适合我国土壤流失的实际情况。

## 2.2 物理模型

物理模型考虑了土壤侵蚀过程的内部机制, 依据较为严密的质量、动量、能量守恒方程, 经过一定简化后, 对土壤侵蚀过程及各因子的变化进行了定量表述。与统计模型相比, 该模型应用经典物理定律描述土壤侵蚀的数学分析工作仍然太少。马嵩乃等 (1997)<sup>[11]</sup> 通过量纲分析与概念结合的方法建立了适用于大于 1:5 万比例尺的坡面土壤侵蚀模型和沟谷土壤侵蚀模型。如坡面土壤侵蚀公式为:

$$E_{s1} = a_0 \left[ \frac{I - I_0}{I_0} \right]^{a_1} h_{s1} \left[ \frac{\delta_t}{d} \right]^{a_2} (\sin 2\alpha)^{a_3} \exp(-a_4 S_{vc})$$

式中,  $E_{s1}$  ——坡面土壤侵蚀深度 ( $mm/a$ );  $I$  ——降雨强度 ( $mm/a$ );  $I_0$  ——不足以产生侵蚀的降雨强度 ( $mm/a$ );  $h_{s1}$  ——坡面径流深度 ( $mm/a$ );  $\delta_t$  ——土层有效厚度 ( $mm$ );  $d$  ——土粒平均粒径 ( $mm$ );  $\alpha$  ——坡面角 ( $^\circ$ );  $S_{vc}$  ——植被覆盖度 ( $\%$ );  $a_0 \sim a_4$  ——地理参数 (无量纲)。

模型中涉及到的因子包括坡度、沟谷密度、植被覆盖度、降雨-径流因子和土质因子等。其中, 坡度信息通过 DEM 派生; 使用目视解译法, 结合航片及 R. E. Horton 和 A. N. Strabler 的沟道分支比关系, 从 TM 影像上提取沟谷密度信息; 植被覆盖度通过对遥感影像进行监督分类来获得; 根据当地雨量站及水文站的资料, 采用二次趋势面分析获得水文信息; 土质因子信息则是根据当地土壤类型图及实测资料得到的。此外, 模型中的地理系数及各无量纲因子团是根据实测土壤侵蚀量, 用非线性回归统计分析求得的。

## 2.3 模型的比较

从预报精度的角度来讲,物理模型无疑是极具潜力的。但目前发展的物理模型需要大量的参数,而有些参数又难以观测,因此在实际应用中还存在诸多困难,尚难以取代经验统计模型在水土流失定量调查中的主导地位。

黄土高原的次降雨模型属于一种基于事件的侵蚀模型。它通过把土壤侵蚀作为一个动态过程来描述,不仅能更准确地监测土壤流失量,而且也能辅助土地管理决策提供更多的信息。因此,特别是在遥感和 GIS 支持下,这种具有连续模拟功能的模型能针对具体年份提供更有实际意义的指导。目前,国外正在进行这类模型的完善工作<sup>[12]</sup>,但真正进入实用化阶段,还需解决长期、可靠、廉价地获取有关动态数据的问题。

迄今为止,建立并广泛应用的定量模型绝大多数是 USLE 系列的年平均土壤侵蚀模型。尽管柯克比等(1987)<sup>[13]</sup>曾对这种简单相乘的算式结构表示异议,认为其缺点在于不允许各因子之间存在线性关系,但由于在实际工作中,该模型表现出了比其它模型往往能更好地满足需要,因此仍被广泛采用。

鉴于研究者针对 USLE 系列模型中的因子提出了各种不同的算法,而它们也基本上是区分不同模型的主要依据,因此有必要了解公式中每一个因子的估算方法和发展过程。

## 3 USLE 系列模型的因子算法

### 3.1 R 因子

降雨侵蚀力因子  $R$  是一项评价降雨引起的土壤分离和搬运的动力指标。其算法视所用降雨观测资料的多寡而分为经典法和简便法两大类。

(1)经典法 因子  $R$  被定义为两个暴雨特征值(降雨动能和最大 30 分钟降雨强度)的乘积,所以又叫  $EI_{30}$  法<sup>[14]</sup>。它需要通过每次降雨过程的日记雨量记录纸资料来获取每次降雨各个时段( $k$ )的历时  $t_k$ 、雨量  $P_k$ 、雨强  $i_k$  以及该次降雨连续 30 分钟的最大雨强  $I_{30}$ ,最后计算出各时段的单位雨量动能  $e_k$ 、时段雨量动能  $E_k$  和该次降雨的总动能  $E$  和  $R$  值。

(2)简便法 由于经典法对降雨数据要求比较苛刻,特别是在缺乏详尽降雨记录的地区难以推广应用。因此,国内外一些研究者分别根据

降雨观测资料的丰缺和流失量的实测值,对经典法做出了修正或提出了适用于当地的简便算法。卜兆宏等(1992)<sup>[15]</sup>对这些不同的  $R$  算法进行了比较研究,结果表明,已有的各种算法均存在不宜使用的地区或不宜使用的年代。

### 3.2 K 因子

土壤可蚀性因子  $K$  值,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,也是 USLE 及其修正模型中的一项重要因子值。对  $K$  值的求取方法,国内外主要有长年小区实测法、查诺模图法、公式计算法和查表法等。

通过小区进行直接测定,需要大量的时间和仪器,而且费用昂贵。因此,对于大多数土壤而言,一般是根据那些最初测定的  $K$  值,将其特性与被测定过的土壤相比较,近似估算这些土壤的  $K$  值,这样就出现了查诺模图法、公式计算法以及查表法。

(1)查诺模图法 Wischmeier 等(1971)提出了土壤可蚀性诺模图法。对于那些预先不能确定  $K$  值的土壤,使用该图,就能获得可蚀性因子  $K$  值。但由于查诺模图法要求较多参数,特别是有的参数很难获得(如准确的渗透速度级别等),故有时难以应用。

(2)公式计算法 Romkens (1986)<sup>[16]</sup>提出了基于土壤颗粒粒级的  $K$  值公式计算法(即  $K(Dg)$  法)。Declereq 和 Poesen (1992)<sup>[17]</sup>通过对比研究后认为,  $K(Dg)$  法适用于细粒结构或粗粒结构的土壤(如粘土或砂土),即使土壤有机质含量不知道,而查诺模图法则比较适合于有机质含量已知的中等结构土壤。

(3)查表法 柯克比等(1987)<sup>[13]</sup>提出了一种较为简便的查表法,只需知道土壤的质地名称及其有机质含量,即可在表中查找到相应的  $K$  值。卜兆宏(1994)<sup>[18]</sup>继续发展了这一方法,针对原表只列出有机质  $\leq 4\%$  的土壤,而缺乏高有机质含量土壤的  $K$  值,提出了一个修正系数表。当土壤有机质含量大于  $4\%$  时,先按  $4\%$  查出  $K$  值再用查修正表得的修正系数乘上它,则得高有机质含量土壤的  $K$  值。

### 3.3 LS 因子

作为侵蚀动力的加速因子,  $LS$  表示在其余条件均相同的情况下,某一给定坡度和坡长的坡面上土壤流失量与标准径流小区典型坡面土壤流失

量和比值。

(1) *L* 因子 坡长被定义为从地表径流的起点到坡度降低到足以发生沉积的位置或径流进入一个规定渠道的入口处的距离。现有研究基本上仍沿用 Wischmeier 和 Smith(1978)<sup>[7]</sup> 提出的坡长因子算式:

$$L = \left[ \frac{l}{22.13} \right]^m$$

式中, *L* ——坡长因子; *l* ——坡长(m); *m* ——坡长指数(当坡度角  $\theta \geq 9\%$  时,  $m = 0.5$ ;  $9\% > \theta \geq 3\%$  时,  $m = 0.4$ ;  $3\% > \theta \geq 1\%$  时,  $m = 0.3$ ;  $\theta < 1\%$  时,  $m = 0.2$ ); 22.13 ——标准小区坡长(m)。

McCool 等(1989)<sup>[19]</sup> 对坡长指数 *m* 的算法做了修改: 令  $m = \beta / (1 + \beta)$ , 其中  $\beta$  用下式表示:

$$\beta = \frac{\sin(\theta/0.0896)}{3.0 \times \sin\theta^{0.8} + 0.56}$$

式中,  $\theta$  ——坡度角。

由于目前坡长因子一般都是通过 DEM 计算得出, 因此在实际工作中, 使用的往往是基于像元的坡长算式, 即:

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i^{m+1} - \lambda_{i-1}^{m+1})}{\lambda_e (22.13)^m}$$

式中,  $\lambda_i$  ——由坡顶沿流水线到第 *i* 个像元末端的距离(m);  $\lambda_{i-1}$  ——由坡顶沿流水线到第 *i* 个像元上端的距离(m);  $\lambda_e$  ——总坡长(m)。

(2) *S* 因子 USLE 中的 *S* 与坡面坡度角  $\theta$  呈抛物线关系, 算式为:

$$S = 65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065$$

考虑到 USLE 的开发者主要是根据美国的耕地坡度(大多小于 20%, 即  $11.3^\circ$ ) 推导出这一算式的, 不太适合坡度较陡的地区使用。因此, 一些研究者提出了改进的 *S* 因子算式(表 1)。

表 1 改进的坡度因子算式

Table 1. Modified slope factor formulae

研究者	改进的坡度因子算式	备注
McCool 等(1987) <sup>[20]</sup>	$S = 10.8 \times \sin \theta + 0.03$	当坡度 $< 9\%$ 时
	$S = 16.8 \times \sin \theta - 0.50$	当坡度 $\geq 9\%$ 时
Liu 等(1994) <sup>[21]</sup>	$S = 21.9 \times \sin \theta - 0.96$	当坡度 $\geq 9\%$ 时
卜兆宏等(1993) <sup>[22]</sup>	$S = 0.6211 \times 203.1567 \sin \theta$	均质土(四川)
	$S = 0.8252 \times 8.5319 \sin \theta$	非均质土(四川)

### 3.4 CP 因子

*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。

(1) *C* 因子 研究表明, *C* 因子要受到诸如植被、作物种植顺序、生产力水平、生长季长短、栽培措施、作物残余物管理、降雨分布等众多因素的控制, 这使得对 *C* 因子值的直接计算往往难以进行<sup>[7]</sup>。通常的做法是根据地表植被的年平均覆盖度、植被冠层类型、高度、农作物栽培和管理制度、以及降雨分布等情况来估算该地区各种土地覆盖类型的年平均 *C* 值。为此, USLE 的提出者们列出了十个表, 供人们按不同情况进行 *C* 值的查找。

作为获取大面积地表覆盖状况的最佳手段, 多光谱遥感数据, 特别是植被指数(如 NDVI) 常被用作反映地表植被覆盖状况的指标, 而遥感分类数据则作为地面覆盖类型的指示, 被用于通过查表来确定其年平均 *C* 值(如文献 3)。

卜兆宏等(1993)<sup>[22]</sup> 根据土壤年流失量及有关参数资料反演出了基于植被覆盖度的自然植被区 *C* 因子算式。通过回归的线性函数, 可用遥感植被指数直接计算出自然植被区的 *C* 因子值。遗憾的是, 该算式明显不适合于当植被覆盖度较大  $> 60\% \sim 80\%$  时的情况, 因为计算出的 *C* 出现了负值。

(2) *P* 因子 侵蚀防治措施因子 *P*, 是指采用专门措施后的土壤流失量与采用顺坡种植时的土壤流失量的比值。通常, 包含于这一因子中的侵蚀控制措施有: 等高耕作、等高带状种植、修梯田。*P* 值变化于 0~1 之间。0 值代表根本不发生侵蚀的地区, 而 1 值代表了未采取任何控制措施的地区。在自然植被区和坡耕地的 *P* 因子一般取值为 1, 凡修了水平梯田的为 0.01, 介于两者之间的治理措施的坡耕地则取值于 0.02~0.7<sup>[11]</sup>。由于空间分辨率的限制, 一般无法利用象 TM 这样的中分辨率的卫星遥感影像来直接提取地面的侵蚀控制措施信息, 目前还只能通过航片或地面调查来获取。

## 4 总 结

基于 GIS 的遥感定量法是一种非常有应用前景的土壤侵蚀调查方法, 目前在一些已有的应用研究中取得了较好的效果。但是, 经过近六十年的理论研究, 研究者们已提出许多不甚相同的土壤流失监测模型。因此, 选择合适的模型及其因子算法, 就成为该方法成功应用的关键。大多数研究表明, USLE 是一个十分可靠的土壤流失监测

模型, 具有较广的适用范围。RUSLE 对 USLE 进行了技术性和确定因子值的改进, 这些改进使得 RUSLE 要比 USLE 更科学和更精确, 并且适用范

围更广。其它模型, 特别是卜兆宏提出的算式虽然具有较好的区域监测效果, 但是还缺乏象 USLE 那样所经过的广泛验证。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 卜兆宏等, 水土流失定量遥感方法及其应用的研究。土壤学报, 1997, 34(3): 235 ~ 245.
- [ 2 ] 卜兆宏等, 应用水土流失定量遥感方法监测山东全省山丘区的研究。土壤学报, 1999, 36(1): 1 ~ 8.
- [ 3 ] 游松财、李文卿, GIS 支持下的土壤侵蚀量估算——以江西省泰和县灌溪乡为例。自然资源学报, 1999, 14(1): 62 ~ 68.
- [ 4 ] Dickinson W. T. Wall G. J. and Rudra R. P., Model building for predicting and managing soils erosion and transport. In: Soil Erosion on Agricultural Land. Boardman J., Foster I. D. L. and Dearing J. A., John Wiley & Sons, Ltd., 1990 415 ~ 428.
- [ 5 ] 李壁成主编, 小流域水土流失与综合治理遥感监测, 北京: 科学出版社, 1995.
- [ 6 ] Wischmeier W. H. and Smith D. D., Predicting Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains. Agricultural Handbook No. 282. Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture, Purdue Agricultural Experiment Station, 1965.
- [ 7 ] Wischmeier W. H. and Smith D. D., Predicting rainfall erosion losses—A guide to conservation planning with the Universal Soil Loss Equation (USLE). Agriculture Handbook No. 537, United States Department of Agriculture, Springfield, USA. 1978.
- [ 8 ] Renard K. G. et al., Predicting Soil Erosion by Water. A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), U. S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook 703, USDA, Washington, D. C., 1992.
- [ 9 ] Renard K. G. et al., RUSLE revisited: Status, questions, answers and the future. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1994, 49(3): 213 ~ 220.
- [ 10 ] Yoder D. and Low n J., The future of RUSLE: Inside the new Revised Universal Soil Loss Equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 50(5): 484 ~ 489.
- [ 11 ] 马蔼乃著, 遥感信息模型, 北京: 北京大学出版社, 1997.
- [ 12 ] Baffaut C. Nearing M. A. and Govers G., Statistical distributions of soil loss from runoff plots and WEPP model simulations. <http://topsoil.nserl.purdue.edu/nearing/wepp-stat/text.htm>.
- [ 13 ] M. J. 柯克比和 R. P. C. 摩根编著, 王礼先等译, 土壤侵蚀, 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [ 14 ] Wischmeier W. H. and Smith D. D., Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Transactions of the American Geophysical Union*, 1958, 39: 285 ~ 291.
- [ 15 ] 卜兆宏等, 降雨侵蚀力因子的算法及其在土壤流失量监测中的选用。遥感技术与应用, 1992, 7(3): 1 ~ 10.
- [ 16 ] Romkens M. J. M., Prasad S. N. and Poesen J. W. A., Soil erodibility and properties. In: Transactions of the VIII Congress of the International Society of Soil Science, Hamburg, 1986 492 ~ 504.
- [ 17 ] Declercq F. and Poesen J., Evaluation of two models to calculate the soil erodibility factor k. *Pedologie*, 1992, XLII (2): 158 ~ 169.
- [ 18 ] 卜兆宏、李全英, 土壤可蚀性(K)值图编制方法的初步研究。遥感技术与应用, 1994, 9(4): 22 ~ 27.
- [ 19 ] McCool D. K. et al., Revised slope length factor for the universal soil loss equation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1989, 32(5): 1570 ~ 1576.
- [ 20 ] McCool D. K. et al., Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1987, 30(5): 1388 ~ 1396.
- [ 21 ] B. Y. Liu, Nearing M. A. and Risse L. M., Slope gradient effects on soil loss for steep slopes. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1994, 37(6): 1827 ~ 1840.
- [ 22 ] 卜兆宏等, 用于土壤流失量遥感监测的植被因子算式的初步研究。遥感技术与应用, 1993, 8(4): 16 ~ 22.

# A BRIEF DISCUSSION ON THE QUANTITATIVE REMOTE SENSING MODEL OF SOIL EROSION AND THE ALGORITHM OF ITS FACTORS

Zhou Bin

(Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002)

## Abstract

The quantitative remote sensing method for soil erosion based on GIS data is currently developed and its key parts are just the soil erosion model, and the formula and algorithm of the model factors. Several important quantitative-predicting soil erosion models are introduced, and also the formula and algorithm of factors of the models on USLE series are compiled in this paper.

**Key words:** soil erosion; remote sensing; GIS; quantitative-predicting model; model factor; algorithm