

基于 GIS 的岩溶地区水土流失 遥感定量监测研究

——以贵州省(原)安顺市为例^{*}

周 斌¹ 杨柏林¹ 洪业汤¹ 何延波²

1. (中国科学院地球化学研究所 贵阳 550002)

2. (中国气象科学研究院农业气象中心 北京 100081)

提 要 本文主要介绍了基于 GIS 的水土流失定量评价模型的组成、各参数因子的算式算法, 以及该模型在贵州省(原)安顺市的应用结果。模型是以修正的通用土壤流失方程(RUSLE)为核心, 在 GIS 中建立模型各因子空间数据, 并通过 PAMAP 对它们进行综合分析。定量评价结果表明, (原)安顺市年平均土壤流失总量为 86777 吨, 平均侵蚀模数为 $409.4 t/km^2 \cdot a$; 轻度以上侵蚀面积 $72.7 km^2$, 强度以上侵蚀面积 $53.2 km^2$ (含剧烈侵蚀面积 $30.9 km^2$)。其平均侵蚀模数与以往实测调查结果相比有 97.5% 的一致性, 表明该方法在贵州省岩溶地区的水土流失监测中具有较高的可靠性。

键 词 水土流失 地理信息系统 遥感 定量监测 岩溶地区

水土流失是指以水为侵蚀动力的土壤侵蚀, 属于各种侵蚀类型中危害最为严重的一种。尤其是在岩溶山区, 水土流失几乎意味着“跑水、跑土、跑肥、跑石、跑伤”, 致使山区贫瘠化、石漠化, 生态环境难以恢复。因此, 水土流失作为关系到岩溶地区生存与发展的重大问题, 一直备受当地政府和科学家的重视。

贵州省岩溶山区由于其独特的地质环境, 土层浅薄贫瘠, 再加上近几十年来一直缺乏有效的管理, 致使土壤侵蚀现象非常严重。据统计, 目前贵州省水土流失面积已占其总土地面积的 43.54%, 石漠化土地占 7.9%^[1]。由土壤侵蚀导致的土地资源环境的恶化, 业已成为严重制约贵州省岩溶地区社会与经济可持续发展的主要问题之一。因此, 加强对贵州省岩溶地区水土流失的监测与防治, 快速、准确提供土壤侵蚀强度、分布状况以及动态变化情况, 是保证我省持续协调发展规划建立在科学翔实基础上, 也是实现土地资源保护的基本手段。

1 水土流失的调查方法

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。以往调查方法主要有工程实验和遥感解译法。其中, 工程实验法采用定点观测的方式来获取对侵蚀过程及其规律的认识, 并最终用于指导定量评价和预报模型的开发与完善。因此, 它是侵蚀理论研究的主要方式。由于自然景观条件千差万别, 直接将这些典型站点的数据进行外推应用, 可能会缺乏必要的地理适用性原则, 而在贵州省目前的经济条件下又不允许在全省范围内对每种独立的地表单元都实施典型观测。

遥感是目前高科技领域中发展迅速、应用广泛的新技术之一, 它是对环境和灾害进行动态监测的先进、有效的技术手段。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、植被覆盖度和土地利用方式的改变等)又易于被遥感技术所记录。因此应用遥感技术对水土流失进行监测, 已成为水土保持科学研究与综合治理监测的重要发展方向之一^[2]。遥感解译法主要是通过通过对一些主要的侵

蚀控制因素进行目视解译后, 根据经验对其进行综合, 进而在遥感图像上划分“侵蚀/基本单元”来实现的。这种方法一直是水土流失遥感调查的主流, 如在我国黄土高原^[2]、南方红壤地带^[3]以及贵州南、北盘江流域^[4]的水土流失调查中均采用了这种遥感解译法。然而该方法存在着诸如主观经验性强^[5]、效率较低、绘图精度差和绝对定标难等方面的弱点, 使得该方法无论在定量、定位还是在定时等三个方面均无法满足现代政府和管理、规划部门对土壤侵蚀和土地退化数据的要求。

地理信息系统(简称 GIS), 是六十年代由加拿大在土地资源清查中首先提出, 并在美欧得到迅速发展的地理学新技术分支, 是多学科交叉的产物。由于 GIS 具有强大的空间信息处理能力, 因此它非常适合于象土壤侵蚀定量评价这样一个需要综合多因素进行分析处理的过程。在最近的一些研究中, 已有人开始运用基于 GIS 的水土流失调查方法^[6]。本文将主要介绍基于 PAMAP GIS 的水土流失评价技术在贵州省(原)安顺市水土流失定量调查中的应用。

2 研究区概况

贵州省(原)安顺市* 位于贵州省中西部苗岭西段, 地理坐标: 东经 $105^{\circ}44'30'' \sim 105^{\circ}58'10''$, 北纬 $26^{\circ}08'10'' \sim 26^{\circ}16'55''$, 南、北、东三面与(原)安顺县毗邻, 西南、北西面分别镇宁、普定县接壤。面积 208.86 km^2 (如图 1)。安顺市属亚热带季风湿润气候区, 气候温和, 年平均气温 14.0°C ($13.7 \sim 14.4^{\circ}\text{C}$), 年平均降雨量 1360.5mm , 雨季(5~9月)降雨常占全年降雨量 70% 以上, 因此全年雨量分布不均, 是贵州省暴雨多发区。

安顺市地处长江与珠江水系分水岭, 地势北高南低, 海拔 $1250 \sim 1560\text{m}$, 相对高差 200m 。岩溶地貌极为发育, 地貌类型多样, 为典型的峰林、峰丛分布区。山地和丘陵面积占全市总面积的 85%, 盆地仅 15%。本市主要土壤类型有石灰土、黄壤、水稻土和菜园土等, 土体厚度大多小于 60cm , 质地以中壤和重壤分布为主, 有机质含量多在 2%~6% 之间。

安顺市原生顶级植被为常绿阔叶林, 但由于长期破坏, 这些原生植被已发生了严重逆向演替。

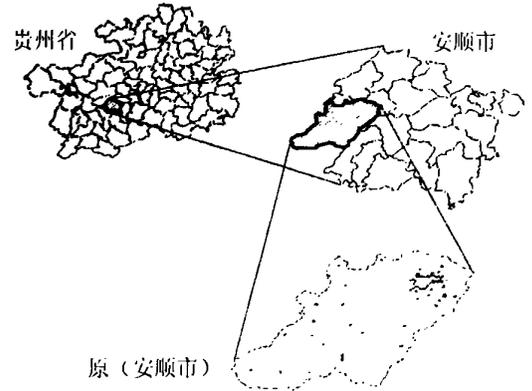


图 1 研究区地理位置

Fig. 1. Geographical location of the study area.

目前安顺市的森林覆盖率仅 3% 左右, 大部分原生森林已演替为灌木甚至草被, 稀疏地分布在土层薄且石质化的山地上。在已垦殖地区, 原生植被已为农田植被所代替, 主要作物有水稻、玉米、小麦和油菜等。

由于暴雨多, 强度大, 加上森林覆盖率低, 易形成大量地表径流。再加上近几十年人地矛盾的持续激化, 毁林造田和陡坡开荒严重, 致使安顺市水土流失问题非常突出, 各种强度的流失面积已占全市总面积的 45.1%^[7], 其潜在的毁坏型土地面积比例是南、北盘江流域中是最高的^[4]。

3 基于 GIS 的土壤侵蚀量监测方法

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。以定点观测研究发展出来的侵蚀量定量评价模型为核心, 结合不同来源的各控制参数资料, 如航测地形图、降雨观测数据、土壤普查和土地利用/土地覆盖资料。经过诸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。

3.1 侵蚀量监测模型

大量对土地退化过程的基础研究使人们逐渐深化了对土壤可蚀性概念的认识^[8], 并且导致了侵蚀定量模型的出现, 这些模型在不同的空间尺度上处理不同的侵蚀过程, 并且已得到较好的发展^[9], 如美国的 USLE、RUSLE、中国的黄土高原次降雨侵蚀量模型^[2]、马谟乃的遥感信息模型^[10]和卜兆宏等人的“似 USLE”模型^[11]等, 其中以 USLE 和 RUSLE 应用

* (原)安顺市、县现已合并, 统称为安顺市, 以下(原)安顺市均简称为安顺市。

** 安顺市行政边界在历史上曾多次变动, 此面积值来自文献[7]。

最为广泛。由于它们在设计时充分综合了来自不同地理、气候条件下的实测资料, 因此具有较好的适用性, 便于推广应用。在目前大部分涉及土壤侵蚀的遥感定量监测中, 均使用了这两个模型。USLE 和 RUSLE 都是为评价长期年平均侵蚀量而设计的, 采用了相同的表达式:

$$A = RKLSCP$$

式中, A ——土壤流失量($t/(ha \cdot a)$); R ——降雨侵蚀力因子; K ——土壤可蚀性因子; 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。

尽管表达式相同, 但 RUSLE 对 USLE 从技术性和确定因子的算法两方面进行了改进^[12]。这些改进使得 RUSLE 具有更广泛的应用范围, 并且预测精度更高^[13]。因而 RUSLE 比 USLE 更科学, 并且 RUSLE 能代表当今最好的侵蚀技术^[14]。因此, 本研究选用 RUSLE 来评价安顺市由于水蚀造成的年平均土壤流失量。对其计算土壤流失的结果, 将产生一项侵蚀剧烈程度的定量指标, 并且通过与以往人工调查结果进行比较来评价该方法的有效性。下面具体介绍 RUSLE 中各项参数以及在研究区应用的计算方法。

3.2 模型参数计算

3.2.1 R 因子

(1) 算式

降雨侵蚀力因子 R 主要用于衡量雨滴冲击的动能, 其经典算法是 Wischmeier^[15] 提出的 EI30 法。由于该方法需要具有详尽降雨时序的雨量 and 雨强资料, 而这一要求在多数情况下, 尤其是缺乏详细数据记录的地区往往难以实现。因此, Arnoldus^[16] 提出了一种计算 R 值的简便方法, 只需用研究区的月降雨和年降雨资料来估算修正的福尼埃指数 (MFI), 然后再通过一个广泛适用于不同地区的 R 因子算式来计算 R 值:

$$MFI = \sum P_i^2 / P$$

式中, P_i ——月降水量 (mm); P ——年降水量 (mm)。

推导 R 因子的算式为^[19]:

$$R_{ann} = (4.17 \times MFI) - 152$$

式中, R_{ann} ——年度 R 因子

(2) 研究区 R 因子值

研究区范围内, 共统计了近 25 年来的月降雨

和年降雨数据。这些数据被用于计算出长期平均月降雨和年降雨资料 (图 2), 然后应用这些多年平均数据计算多年平均 MFI 指数, 最后再推导出研究区多年平均 R 因子。计算结果为:

$$MFI = 179.47$$

$$R_{ann} = 596.41 [100 m^3 t^3 cm / (ha^3 hr^3 a)] = 5849 [MJ^3 mm / (ha^3 hr^3 a)]$$

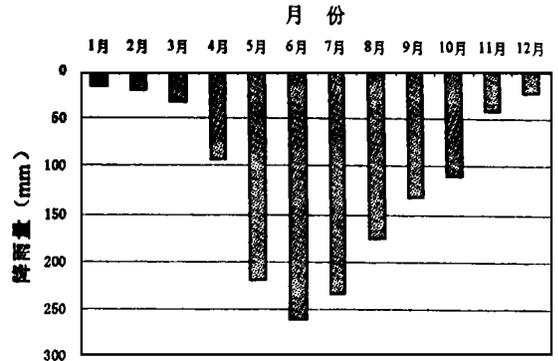


图 2 研究区近 25 年间的月平均降雨量 (mm)

Fig. 2. The monthly average amount of precipitation during the past 25 years.

3.2.2 K 因子

(1) 算式

土壤可蚀性因子 K , 是对某一特定土壤固有的可蚀性的定量描述, 主要由土壤的机械组成 (N_1)、粒级含量 (N_2)、有机质含量 (O_m)、土壤结构级别 (S)、土壤渗透级别 (P) 等土壤性状决定。对 K 值主要有两种计算方法, 一为诺模图法, 另一为 Romkens^[17] 提出的 $K(Dg)$ 法。Declereq 和 Poesen^[18] 进行了适用于不同土壤结构 K 因子最佳算式方面的研究, 结果表明查诺模图法比较适合于有机质含量知道的中等结构土壤, 而基于粒级的方法 (即 $K(Dg)$ 法) 则最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。

对于小于 10% 岩屑的土壤, $K(Dg)$ 计算公式如下^[17]:

$$K(Dg) = 0.0035 + 0.0388 \times e^{-0.5 \times \{[(\log Dg) + 1.519] / 0.7584\}^2}$$

式中, $K(Dg)$ ——土壤可蚀性因子 [$t^3 ha^3 / ha^3 MJ^3 mm$]

$$Dg (mm) = e^{0.01 \times \sum (f_i \times h(m_i))}$$

式中, f

i ——第 i 级粒级组分的重量百分比; m_i

——第 i 级粒级组分限值的平均值(mm)。

(2) 研究区 K 因子计算

利用贵州省第二次土壤普查资料,收集了研究区各种土壤的机械组成、粒级含量、有机质含量数据,根据其质地组成分别用 $K(D_g)$ 法和查诺模图法来计算 K 值,结果如表 1 所示。

表 1 研究区不同类型土壤的 K 值

Table 1. K values of different types of soil in the area studied

土壤类型		K 值 ($t^{\circ}hm^2 \cdot h/hm^2 \cdot MJ^{\circ}mm$)
黄壤(综合)		0.040 8
黑色石灰土		0.041 4
黄色石灰土		0.025 4
水稻土	幼黄泥土	0.030 9
	大土泥田	0.025
	黄泥田(黄砂泥田)	0.042 3
	大泥田	0.037
	小黄泥田	0.028 4
	大眼泥田	0.034 4
	潮泥土	0.040 5
	冷水田	0.035 6
	鸭屎泥田	0.039 6
	冷侵田	0.041 7
	白胶泥田(熟白胶泥田)	0.026 7

3.2.3 地形因子(LS)

复合因子(LS)是侵蚀动力的加速因子,表示在其余条件均相同的情况下某一给定坡度(S)和坡长(L)的坡面上土壤流失量与标准径流小区典型坡面(坡长为 22.13 m,坡度为 5.14°)土壤流失量和比值^[19]。对于复杂的不平整坡面,需要事先将它分割成数个土类和坡度都均一的坡段,这样才可以使用在典型坡面上发展起来的 LS 因子算式来计算。

(1) LS 因子算式

按照 Wischmeier 和 Smith(1978)提出的程序,应用经过改进的坡长因子^[20]和坡度因子^[21]来进行研究区每一个坡段 LS 因子的计算,具体公式为:

RUSLE 的改进坡长因子算式(规整坡度)^[22]:

$$L = (\lambda/22.13)^m$$

式中, L ——坡长因子; λ ——水平坡长(m); m ——坡长指数; 22.13 ——标准小区坡长(m)。

其中, $m = \beta / (1 + \beta)$, 式中, β 可表示为^[20]:

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

式中, θ ——坡度角。改进的 RUSLE 坡度因

子^[21]:

$$S = 10.8 \times \sin\theta + 0.03 \quad \text{当坡度} < 9\%$$

$$S = 16.8 \times \sin\theta - 0.50 \quad \text{当坡度} \geq 9\%$$

RUSLE 中任一坡面第 i 坡段的 LS 因子^[19]:

$$LS_i = \frac{S_i \times (\lambda_{i+1}^m - \lambda_{i-1}^m)}{(22.13^{m_i}) \times (\lambda_i - \lambda_{i-1})}$$

式中, S_i ——第 i 坡段的坡度因子; λ_i ——第 i 坡段的水平坡长; m_i ——第 i 坡段的坡长指数。

(2) 研究区 LS 因子的计算

由于研究区的坡面大多数是不平整的,所以必须将它们分成均一坡段来分别计算它们的 LS 因子。为此,我们应用 Rusle-Flow line-LS(由比利时根特大学森林与水管理学系提供)这一程序来计算每个坡段的 LS 值,在这种情况下就是沿流水线的每个像元的 LS 。按照 Jenson 和 Domingue(1988)描述的步骤可由数字高程模型(DEM)来推导出流水线^[23]。

3.2.4 覆盖管理因子(C)和水土保持因子(P)

USLE 和 RUSLE 的 C 因子和 P 因子主要是反映植被或作物及其管理措施对土壤流失总量的影响。作为土壤侵蚀动力的抑制因子,它们被用于产生一项指标来表明土地利用是如何影响土壤流失以及覆盖管理或水土保持措施在多大程度上抑制了土壤侵蚀。

作物管理因子 C 是在相同的土壤、坡度和相同的降雨条件下,某一特定作物或植被情况时的土壤流失量与一耕种过后连续休闲地的土壤流失量的比值。这个因子衡量所有相互影响的覆盖和管理变量,包括植被、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、降雨分布等的综合效应^[22]。由于有许多种植和管理体制,所以,往往难以通过实测来评价因子 C 。在那些缺乏单位地域季节作物类型数据的地方,通常的做法是对特定覆盖类型进行估计。对于安顺研究区,根据文献和卫星影像分类数据来对每种土地利用类型的年平均 C 因子值进行估计。

水土保持措施因子 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^[24]。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,这些措施可以有效地提高一个地区的抗蚀能力。

(1) TM 影像分类

收集了研究区 1987 年 2 月 17 日的 TM 影像。根据野外调查和土地利用现状图资料,采用

最大似然法对它进行分类处理, 结果生成有 7 种覆盖类型的土地覆盖图, 具体类别被确定如下:

- ① 水体: 人工水库、池塘及较宽的河流
- ② 建成区: 农村居民地和城镇
- ③ 水田
- ④ 旱地(包括菜地)
- ⑤ 林地(原生、次生、阔叶针叶林)
- ⑥ 灌草地(灌木、草地)
- ⑦ 裸岩(基本无土壤覆盖的碳酸盐岩裸露区)

(2) 研究区不同土地利用类型的 C 、 P 值

分别给每一种地物类型赋予一相应的 C 和 P 值(表 2)。 C 和 P 值均变化于 0~1 之间, 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。对于研究区而言, 水田基本上已梯田化, 但旱地却仍有相当一部分未采取任何措施。裸岩之所以被赋予 0, 主要是因为虽然它对土壤侵蚀的敏感程度很高, 但却基本无土壤层可被侵蚀^[25]。

表 2 研究区各种土地利用类型对应的 C 和 P 值

Table 2. The corresponding C and P values of different types of utilized soils in the area studied

土地覆盖类型	水体	建成区	水田	旱地	林地	灌草地	裸岩
C	0	0	0.1	0.7	0.001	0.011	1
P	0	0	0.15	0.5	1	1	0

3.3 模型的运算

3.3.1 各因子 GIS 图层的建立

RUSLE 方程实际上就是将所有因子相乘从而获得一个土壤流失值, 用 $t/ha \cdot a$ 表示。结合 GIS 具有强大空间运算能力的优点, 可计算研究区每个像元的土壤流失量。为此, 应首先将上述各因子(值)结果输入 PAMAP GIS 中, 建立相应的专题图层。

(1) R 因子: 由于研究区范围不大, 仅 200 余平方公里, 降雨分布相对均一, 故根据代表雨量站多年平均数据计算出唯一 R 值, 该值只需以常数形式输入模型算式中即可。

(2) K 因子: 先数字化研究区的第二次土壤普查成果的土壤图件(类型、质地等), 并生成多边形(Polygon)数据。再将计算出每种土壤类型的 K

值作为属性输入该层数据库, 最后以 K 值作为覆盖值生成 K 值栅格(在 PAMAP GIS 中以 surface 数据格式存在)数据。

(3) LS 因子: 程序 Rusle-Flow line-LS 计算出的 LS 因子值结果以 ASCII 码文件格式存在, 因此可通过 PAMAP GIS 中的格式转换模块(Translator)中的 ASCII 文件转换程序(Import Raster to PAMAP GIS)将其直接输入到 PAMAP 中 Surface 层中生成 LS 栅格数据。

(4) CP 因子: TM 影像是在工作站版 ER MAPPER(5.1)遥感图像处理软件上进行处理和分类的。由于文件格式不匹配, 需经自编的 ER MAPPER-TO-PAMAP 程序转换处理后, 方可将分类结果文件输入 PAMAP 中的 Surface 层中。然后根据 C 、 P 赋值表(见表 2)在 PAMAP 中对其进行赋值, 生成相应的 C 、 P 值 Surface 数据层。

3.3.2 图层的几何配准

由于各因子图层数据来源不同, 在空间位置上难免出现偏差。因此需要对它们进行几何配准。选择 15 个同名点位作为控制点(GCP), 使用二次多项式和最邻近法分别进行坐标变换和数据重采样。将这些因子图层都统一校正到能与 DEM 套合配准($RMS \leq 0.3$ 像元), 从而确保了各层空间数据之间相互迭加分析的准确性和可靠性。

3.3.3 模型的迭加运算

经过上述各因子数据层的建立和配准处理后, 就可以进行相互复合运算了。该运算通过 PAMAP GIS 中的模型运算模块(Modeller)中的 Model Formula Surface 程序进行。在该程序界面中, 先定义定位各层参数, 然后输入 RUSLE 方程式, 其运算结果 A 值将输出到另一 Surface 层中。

4 结果与讨论

4.1 多年平均流失量 A

RUSLE 是针对年平均土壤流失量监测而发展起来的。在 GIS 中进行上述运算后, 即可得到研究区各像元多年平均流失量结果。图 3 显示了研究区多年平均土壤流失强烈程度。从图中可看出, 土壤流失量最严重的地区, 主要集中在安顺市南部和中部的岩溶丘陵、山地区。另外, 由于地处分水岭, 加上植被覆盖差, 土地利用类型主要是坡耕旱地, 研究区西北部的岩溶高原区的水土流失

也比较严重。

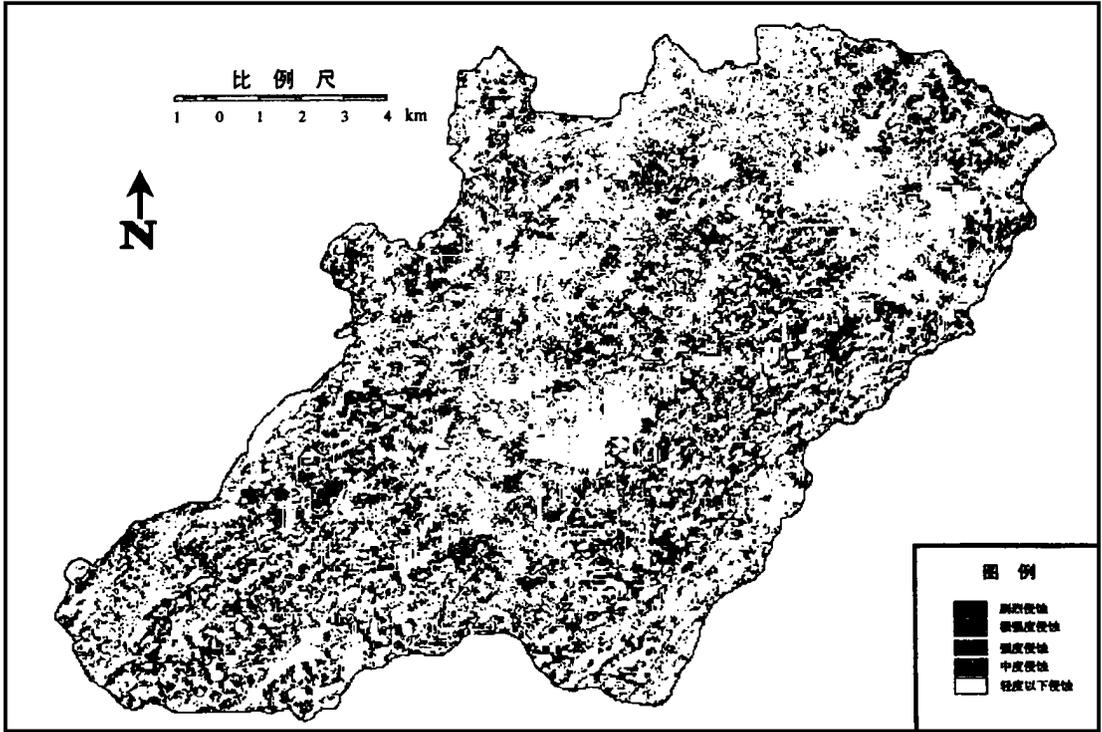


图 3 安顺市多年平均土壤流失强度图

Fig. 3. Extent of water erosion in the past years in Anshun City.

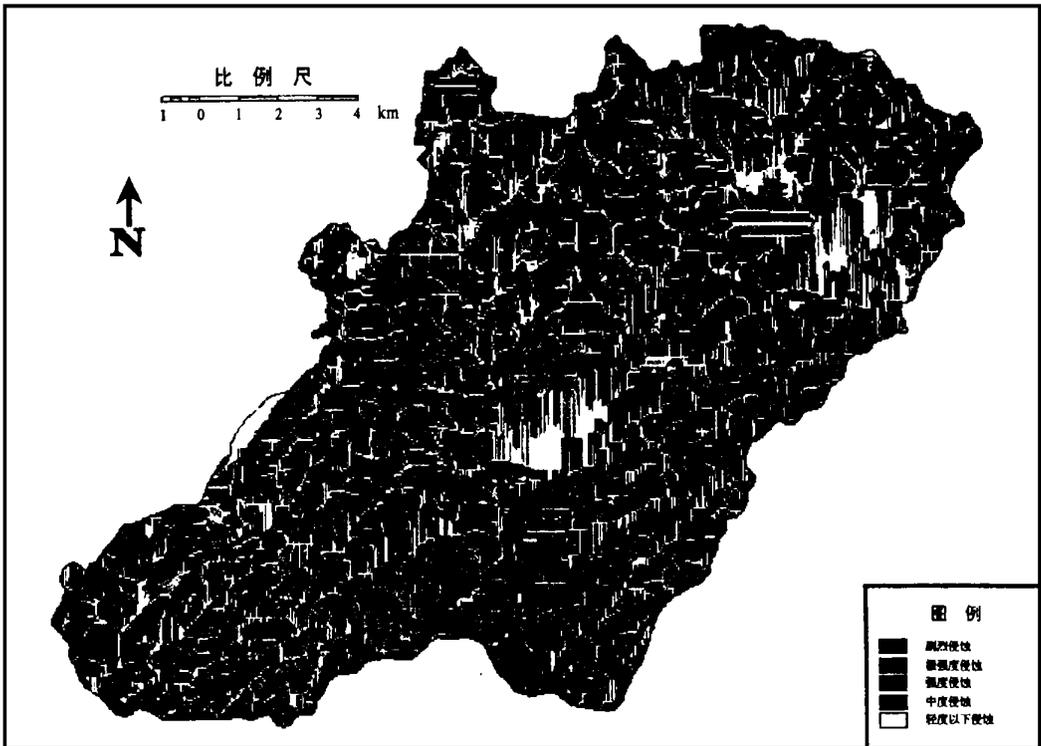


图 4 安顺市潜在的土壤流失强度图

Fig. 4. Extent of potential water erosion in Anshun City.

4.2 潜在流失量 A_p

指在没有任何植被覆盖和水土保持措施的情况下, 例如无植被或作物覆盖, 未梯化或等高种植、带状垄作等翻耕裸土地的年均流失量。用下式来衡量:

$$A_p = RKLS$$

图 4 显示研究区的潜在土壤流失状况, 它对于侵蚀高危险区的认识和制订侵蚀防治措施均有好处。通过实际流失量与潜在流失量进行对比, 可以发现覆盖植被、人工建筑、水体或梯田化的耕地, 这些措施都大大降低了土壤流失量。这一比较提供了一项指标用于反映在当前土地利用条件下, 土壤流失量在多大程度上影响了水土流失, 也可反映所应用的侵蚀控制措施是否有效。

4.3 高危险区

根据最大允许流失量来评判侵蚀危险区或那些被纳入治理规划的地区, 最大允许土壤流失量是指在维持土地高的生产力水平的前提下的最大土壤侵蚀率。根据 1984 年水利部颁布的标准, 认为土壤允许流失量一般为 $2 \sim 10t/ha \cdot a$, 总土壤流

失量超过该标准的地区才被看作是侵蚀危险区。但这一标准主要是根据非岩溶地区的资料推算得来的。由于碳酸盐岩风化成土能力极低, 因此应用上述标准有可能低估岩溶地区土壤侵蚀的实际危险性。柴宗新(1989)依据广西、贵州、云南、湖北等地的碳酸盐岩溶蚀速率研究资料, 估算出当碳酸盐岩的含量超过 70% 时, 岩溶地区的最大允许流失量为 $0.68t/ha \cdot a$, 并制订了相应的岩溶地区土壤侵蚀分级指标。本次对安顺市的土壤侵蚀强度划分中采用了这一标准。

分别根据多年平均流失量 A 和潜在流失量 A_p 进行了侵蚀危险评价, 图 3 和图 4 中的中度以上侵蚀区均代表了危险区。通过对比发现, 该地区对土壤侵蚀是非常敏感的(潜在的), 但已造成毁坏的地区(裸岩区)和采取的一些植被覆盖方式使得实际流失量大大减少了。

4.4 模型的有效性

为检验本方法的可靠性, 将本次工作结果与以往常规地面调查进行比较。据贵州省安顺市农业区划委员会在 80 年代初期进行的农业自然资源调查, 安顺市每年土壤流失量为 $83452t^{[7]}$, 由

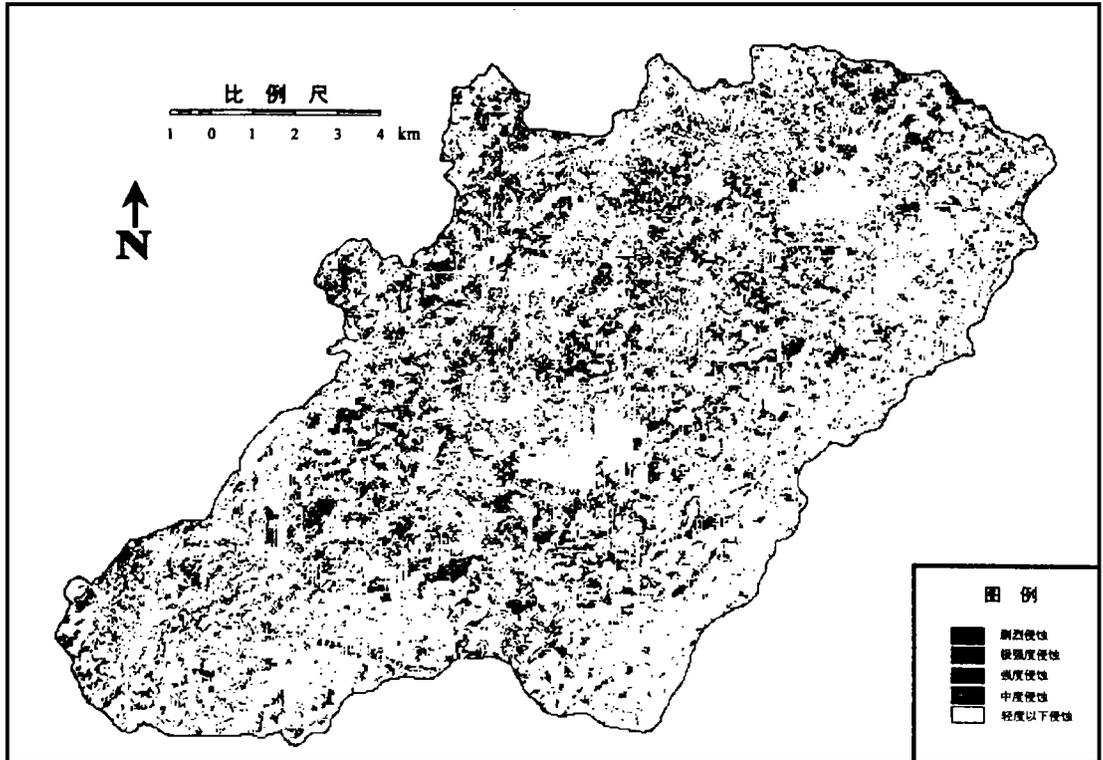


图 5 治理后的安顺市土壤流失预测图

Fig. 5. Prediction of water erosion in Anshun City after harnessing measures have been taken.

此推算出全区平均侵蚀模数为 $399.6 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ 。本研究模型运算结果表明,安顺市平均侵蚀模数为 $409.4 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$, 年土壤流失量达 $86\,777 \text{ t}$ (本次调查中采用的面积为研究区的数字化面积 211.96 km^2), 其侵蚀模数的监测精度达到了 97.5% 。

4.5 土壤侵蚀的防治措施

为了防止陡坡水土流失及其导致的农业生产下降和下游河道水库的泥沙淤积, 必须采取合理有效的防治措施。在安顺市, 根据当地习惯, 灌溉水田已基本梯化, 而非灌溉农用地, 则普遍缺乏有效的侵蚀控制措施。因此, 该地区的重点防治

区应当是裸露的岩山和陡坡旱地。一些相应的防治措施业已提出并在执行中, 如封山育林、大于 25°C 的耕地须退耕还林还草等。为此, 我们对研究区所有陡坡耕地还林还草以及裸岩、荒地全部森林化并且成熟后的情况下进行了土壤流失量模拟。结果表明, 该地区的土壤流失量减少了一半多, 其年平均流失量降为 $42\,710 \text{ t}$ (如图 5), 但仍有 $1/4$ 的区域处于侵蚀危险区。其流失贡献主要来自小于 25° 坡耕旱地, 甚至是小于 15° 的缓坡旱地。这说明目前在岩溶地区所提出的一些水土保持措施 (仅仅针对裸岩和陡坡耕地进行治理) 可能并不足以完全解决该地区的土壤流失问题。

参 考 文 献

- 唐健生, 夏日元. 论南方岩溶石山区水土资源开发治理. 见: 岩溶石山地区资源、环境与可持续发展研讨会论文集, 1998, 81~85
- 李壁成. 小流域水土流失与综合治理遥感监测. 北京: 科学出版社, 1995.
- 袁崇桓, 聂洪锋. 我国南方红壤分布区 1: 20 万水土流失遥感调查方法探讨. 遥感技术与应用, 1993, 8(1): 8~13
- 安和平, 等. 流域生态经济与防护林体系建设 (贵州南、北盘江流域). 贵阳: 贵州民族出版社, 1994.
- Pickup G and Chewing S V H. Forecasting patterns of soil erosion in arid lands from Landsat Mss data. *Int. Jour. of Rem. Sensing*, 1988, 9: 69~84
- 陈子丹, 李琳, 严慕媛. 基于 GIS 多因子分析及其信息融合技术的土壤侵蚀分级制图研究. 遥感信息, 1998, 2: 16~19
- 安顺市综合农业区划编写组. 《安顺市综合农业区划》. 贵阳: 贵州人民出版社, 1990.
- Bryan R B, Govers G and Poesen J. The concept of soil erodability and some problems of assessment and application. *Catena*, 1989, 16: 393~412
- 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 Deaning J A. John Wiley & Sons Ltd., 1990, 415~428
- 马蔼乃. 遥感信息模型. 北京: 北京大学出版社, 1997.
- 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
- Nelson R. Predicting Soil Loss; Comparing the USLE and RUSLE. <http://www.nagreen.com/vol.2.Issue1.April.1997>.
- Renard K G, et al. RUSLE revisited. status, questions, and the future. *J. of Soil and Water Conservation*, 1994, 49(3): 213~220
- Yoder D and Low n J. The future of RUSLE; Inside the new Revised Universal Soil Loss Equation. *J. of Soil and Water Conservation*, 1995, 50(5): 484~489
- Wischmeier W H and Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Transactions American Geophysical Union*, 1958, 39: 285~291
- Arnoldus H M J. An approximation of the rainfall factor in the universal soil loss equation. New York: John Wiley and Sons, 1980, 127~132
- Romkens M J M, Prasad S N and Poesen J W A. Soil erodibility and properties. In: *Transactions of the XIII Congres of the International Society of Soil Science*, Hamburg, 1986, 492~504
- Declercq F and Poesen J. Evaluation of two models to calculate the soil erodibility factor k. *Pedologie*, 1992, XLII(2): 158~169
- Renard K G, et al. RUSLE Agricultural Manual NR. 703; Predicting Soil Erosion by Water; A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal soil Loss Equation (RUSLE). United States department of Agriculture, Springfield, USA, 1992.
- McCool D K, et al. Revised slope length factor for the universal soil loss equation. *Transactions of the Am. Soc. Of Agric. Engrs.*, 1989, 32(5): 1570~1576
- McCool D K, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. *Transactions of the Am. Soc. Of Agric. Engrs.*, 1987, 30(5): 1388~1396
- Wischmeier W H and Smith D D. Agriculture Handbook No. 537; Predicting rainfall erosion losses — A guide to conservation planning with the Universal Soil Loss Equation (USLE). United States Department of Agriculture, Springfield, USA, 1978.
- Jenson S K and Domingue J O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Pho-*

togrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988, 54(11): 1592 ~ 1600

24 柯克比, M J 和 R P C 摩根编著, 王礼先, 等译. 土壤侵蚀. 水利电力出版社, 1987.

25 Xu Z. A study of the vegetation and floristic affinity of the limestone forests in southern and southwestern china. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 1995, 82(4): 569 ~ 580

26 PAMAP GIS(tm) 4.2 REFERENCE GUIDE, 1995, EPS.

27 柴宗新. 试论广西岩溶区土壤侵蚀. 山地研究, 1989, 7(4): 255 ~ 260

STUDY ON QUANTITATIVE REMOTE SENSING MONITORING OF SOIL EROSION IN KARST AREAS BASED ON GIS —— AS EXEAMPLIFIED BY ANSHUN CITY, GUIZHOU

Zhou Bin¹ Yang Bailin¹ Hong Yetang¹ He Yanbo²

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

2. (Research Center for Agrometeorology and Remote Sensing Application, Chinese Academy of
Meteorology Science, Beijing 100081)

Abstract: A quantitative remote sensing method for soil erosion losses based on GIS, the formula and algorithms for model factors, and its application in the karst areas of Anshun City, Guizhou Province are described in this paper. We used the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) as the erosion model for monitoring the soil erosion, built up the spatial database of each model factors, and finally estimated the soil loss in the study area supported by PAMAP GIS. The result shows that the annual total soil loss in Anshun adds up to 86,777 tons, and the average soil erosion loss reaches 409.4 ton/km² · a. The agreement of 97.5% between the estimated value and the observed value by field surveys indicates that this method is accurate and useful in quantitatively monitoring soil erosion in Guizhou karst areas.

Key words: soil erosion; GIS; quantitative monitoring; remote sensing; karst area