

土壤流失量遥感监测中 GIS 像元地形因子算法的研究*

卜兆宏 唐万龙 潘贤章

(中国科学院南京土壤研究所, 210008)

摘要

GIS 像元地形因子的算法, 是土壤流失量遥感监测中的关键技术。对于其算法原理、应用程序、应用结果和应用精度, 本文作了介绍和讨论。经实际应用表明, GIS 像元地形因子算法虽比图斑地形因子算法的运算量大和较复杂, 但它有较严密可靠、较高的应用精度和较好的自动化程度。因像元坡长几乎相等而忽视或视像元坡长因子为相同的常数, 都将导致流失量监测的重大错误。

关键词 土壤流失量, 像元地形因子, 像元坡长因子

地形因子, 包括坡度因子 S 和坡长因子 L 。在按通用流失方程 (USLE) 监测流失量时, 过去常使用图斑为基础的坡度和坡长来计算 S 和 L , 较为简单, 其监测精度也往往不高。随着遥感和地理信息系统 (GIS) 技术的发展, 使用像元或栅格为基础的坡度和坡长也就替代了图斑为基础的坡度和坡长而计算像元地形因子 (L_i, S_i)^[3,5,6]。然而, 由于像元远比图斑小, 像元地形因子远比图斑地形因子的运算量大, 且复杂得多, 因而不能简单套用现成算法。在已往的遥感和 GIS 应用中, 国内外都有不顾及这一复杂性的现象, 或采用各像元相同的坡长和坡长因子值^[2], 或认为像元坡长小而在 USLE 中没有使用坡长因子值^[3], 显然是不妥当的。

为开展土壤流失量的遥感监测, 我们注意到 GIS 像元地形因子计算的复杂性, 先后研究了象元坡度新算法^[1]、像元地形因子算法及其软件的研制, 并经实际应用取得了良好效果^[4]。本文仅就 GIS 像元地形因子算法的原理及其应用汇集于后。

一、算法原理

GIS 像元地形因子的算法原理, 主要由像元坡度因子和像元坡长因子算式组成。

(一) 像元坡度因子的算式

1. 像元坡度算式 目前, 国内外文献中用到的像元坡度算式至少有 7 种, 但多数不能用于土壤流失量监测中^[1]。虽然其中的九点曲面拟合法尚可, 但因其运算量大和不适

* 国家自然科学基金资助项目。

1) 卜兆宏、席承藩、唐万龙、李士鸣, 1991: 遥感监测红壤年流失量研究的初步进展。第七届全国遥感技术学术会议论文集, 广东, 阳江市, 523—527 页。

应于边界少于 9 点高程的情况而不便选用。为此,我们依据像元中心水流方向的规律,提出了像元坡度新算法。其算式为

$$\theta_i = \max_{j=1-8} \tan^{-1} \left(\frac{h_i - h_j}{D} \right) \quad (1)$$

式中 θ_i 为待求像元 (i) 的坡度,以度表示; h_i 为待求像元的高程; h_j 为其 8 个邻像元 (j) 的高程; D 为两邻像元中心距,当 $j = 2, 4, 6, 8$ (即为北、西、南、东方向)时, $D = d$ (像元边长值),而当 $j = 1, 3, 5, 7$ (即为东北、西北、西南、东南方向)时, $D = \sqrt{2}d$; \max 为最大值符; \tan^{-1} 为反正切符。(1) 式的应用结果表明,新算法更具合理性、可靠性和适应性。

2. 像元坡度因子算式 USLE 的坡度因子 S 与坡度呈抛物线关系,其算式为^[7]

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

式中 θ 为坡度角。当坡度以百分数 (s) 表示时, $\theta = \tan^{-1}(s/100)$ 。它比 Kirkby 介绍的 $S = (0.43 + 0.30s + 0.043s^2)/6.613$ 精确^[6]。只有当坡度 $s < 20\%$ (在 Kirkby 式中 $s = 20$) 时, s 才可替代(2)式中的 $\sin \theta$ 。考虑到(2)式诞生地的美国耕地坡度大都小于 20% (即 11.3°),而我国山丘耕地却有相当数量达 25° (即 46.6%)以上,故需研究适于我国情况的 S 算式。

根据同一年四川省遂宁、岳池、江津三县水保试验站 14 个 5 种 $5^\circ - 25^\circ$ 不同坡度同耕作状态径流小区的和福建省安溪县水保试验站 5 个 5 种 $10^\circ - 26^\circ$ 不同坡度裸土径流小区的实测流失量资料,我们分别建立了均质土和含砂粒非均质土的 S 算式。均质土的 S 算式为

$$S = 0.6315 \times 1.0935\theta \quad (3)$$

或

$$S = 0.6211 \times 203.1567 \sin \theta \quad (3')$$

非均质土的 S 算式为

$$S = 0.8341 \times 1.0359\theta \quad (4)$$

或

$$S = 0.8252 \times 8.5319 \sin \theta \quad (4')$$

式中 θ 为坡度角,以度表示。(3)'和(3)式的 S 和流失量的相关系数为 0.833, $n = 14$, 在 0.01 显著水平上为非常显著。(4)'和(4)式 S 与流失量的相关系数为 0.945, $n = 4$, 显著性稍差些。

像元坡度因子算式,完全可套用(2)、(3)、(4)式,只是其 θ 改用像元的 θ_i 而已。在我们的算法软件中,最初使用的是(3)'和(4)'式。

(二) 像元坡长因子的算式

1. 坡长的定义与算式 坡长有实际坡面坡长和像元坡面坡长。

(1) 实际坡面坡长的定义与算式。其定义是指从地表径流开始产生的起点至坡度降低到开始出现沉积处或者至径流进入界限分明的沟渠那一点的斜坡距离^[4,7]。一般说来,径流产生的起点应是山脊线,而开始沉积处应是沟谷线或是高地与河湖塘库水域交接处。对于图斑而言,应包含有径流的起点和沉积点。其坡长 l 算式为

$$l = D / \cos \theta \quad (5)$$

式中 D 为起始点与沉积点间的水平距, θ 为坡面平均坡度角。

(2) 像元坡面坡长的定义与算式。其定义是指地表径流产生的起点至该像元下边缘与上边缘斜坡距离之差。据此,其算式为

$$l_i = \sum_1^i (D_i / \cos \theta_i) - \sum_1^{i-1} (D_i / \cos \theta_i) = D_i / \cos \theta_i \quad (6)$$

式中 l_i 为像元坡长; D_i 为沿径流方向每个像元坡长的水平投影距 (实际为两邻像元中心距,随方向而异,或为 d 或 $\sqrt{2}d$); θ_i 为每个像元的坡度; i 为自山脊像元(1)至该待求像元的个数。(6)式右边计算像元坡长很简单,但其中部非常重要,是按像元坡长定义的数学描述。

2. 像元坡长因子算式 它来源于 USLE 的坡长因子算式,但更复杂些。

(1) USLE 的坡长因子算式。对于一个含有起点和沉积点的完整图斑来说,可直接应用 USLE 的坡长因子 L 算式,其算式为

$$L = (l/22.13)^m = [D/(22.13 \cos \theta)]^m \quad (7)$$

式中 l 为图斑坡面坡长,以米为单位; 22.13 (米)相当于 72.6 英尺,为标准径流小区的坡长值; m 为指数;其余与(5)式含义同。 m 值随坡度而变: 当坡度 $\theta \geq 5.14^\circ$ 时, $m = 0.5$; 当 $5.14^\circ > \theta \geq 1.72^\circ$ 时, $m = 0.4$; 当 $1.72^\circ > \theta \geq 0.57^\circ$ 时, $m = 0.3$; 当 $\theta < 0.57^\circ$ 时, $m = 0.2$ 。(7) 式也可改写为

$$L = [l^{m+1}/(22.13^m \times l)] \quad (7')$$

其 L 数值与(7)式同。

(2) 像元坡长因子算式。按照像元坡长的定义与算式,仿(7)式导出像元坡长因子 L_i 算式为

$$L_i = \left[\left(\sum_1^i D_i / \cos \theta_i \right)^{1+m} - \left(\sum_1^{i-1} D_i / \cos \theta_i \right)^{1+m} \right] \cos \theta_i / (22.13^m \cdot D_i) \quad (8)$$

式中各字符含义与(6)、(7)式同。

对于不完整图斑,如只含山脊或只含山谷或处于坡面中部均不含山脊和山谷的图斑,其坡长因子的计算用(7)式是不妥的,而应参照使用(8)式才可准确算出 L 值来。

二、算法应用

(一) 应用程序

在土壤流失量遥感监测中,像元地形因子算法的应用程序如下。

1. 收集应用实验区资料 应收集的资料有地形图、土壤图及土壤类型的理化分析资料、降雨资料、遥感数据磁带、土地利用与保土工程措施资料,等等。

2. 编制 USLE 因子图 利用所收集的资料,按照各因子算法要求,编制出以等值线表示的降雨侵蚀力 R 因子图、以图斑表示的土壤可蚀性 K 因子图。植被覆盖与作物管理 C 因子图,则通过遥感数据磁带的处理,并参照流失量实测资料完成。保土措施 P 因子图,是从遥感数据图像提取信息,并参照已有资料获得。

3. 地形图和因子图数字化: 为取得像元地形因子 (L_i, S_i) 图, 需地形图数字化。数字化方法有格网点读数法、手持光标跟踪法和光学扫描法。地形图数字化后, 经软件内插运算, 生成数字高程模型 (DEM)。DEM 数据的密度, 应与遥感数据的像元数 (即边长 d 为 TM 的 30 米) 一致, 以免不降低或达不到遥感数据监测的空间精度。R 因子图、K 因子图数字化的密度 (即象元边长), 亦是如此。C、P 因子图, 由遥感数据处理而成, 无需数字化。

4. 编制算法软件¹⁾ 按(1)、(3)、(4)、(6)和(8)式编制像元地形因子 S_i, L_i 的算法软件, 输入 DEM 数据后, 运行该算法软件, 则可输出像元地形因子 S_i 和 L_i 图, 或 S_i, L_i 乘积图。

5. 监测流失量 将数字化后的 R_i, K_i 因子图和 C_i, P_i 因子图, 分别与 S_i 或 L_i 因子图或 S_i, L_i 因子积图配准, 将六大因子图按像元连乘后再乘 224.2, 则可获得每个像元的流失量 A_i 图。 A_i 图也就是像元流失量监测图。

上述应用程序的实验区, 有微流域、小流域和全县境。微流域位于江西红壤生态站, 仅 146.3 平方米, 涉及 27×19 个 1×1 米的像元, 但坡度、坡向、坡长变化很大, 而其余因子 $R_{99\%}, K, C, P$ 可视为常数, 分别为 418.517、0.285、0.45、1。小流域为张家口地区水保站属区, 1.5 km², 涉及 160×264 个 10×10 米的像元, 除 R 值可视为常数外, 其余因子值均变化较大。全县境为山东临朐县, 1887.5 km², 涉及 1761×2058 个 30×30 米的像元, 各因子值均不同。

(二) 应用结果

在微流域应用上述算法和程序的主要结果有像元坡度因子 S_i 图 (数值变化于 0.63—30.09)、像元坡长因子 L_i 图 (0.21—1.73) 和像元流失量 A_i (2313—90181 t/km²·年) 图, 以及全微流域总流失量 ($\sum A_i = [A_1 + A_2 + \dots + A_{146}] \times 10^{-6} \times$ 像元面积 = 2.8902 吨) 和单位面积年流量或像元平均流失量 (即侵蚀模数 $\bar{A}_i = 19795.75 \text{ t/km}^2 \cdot \text{年}$) 等数据。其中间结果还可根据需要打印出, 有流水方向线号 N 图 (1—75, 可反映坡向)、像元坡度 θ_i 图 (0—43.23°) 和像元坡长 l_i 图 (1.000—1.743 米), 以及全流域的平均坡度 $\bar{\theta}$ (18.313°)、水流线总数的平均坡长 \bar{l} (2.516 米)、加权平均坡长 \bar{l}_w (5.249 米)。

限于篇幅, 无法将微流域、小流域和全县境的应用结果一一列出。为便于讨论, 仅从微流域的应用结果中摘出 1 号流水方向线中前 8 个像元和 24 号中全部 8 个像元的坡度、坡长及其因子 S_i, L_i 值, 列于表 1。

(三) 应用精度讨论

算法的应用精度, 取决于算法本身的可靠性和应用于土壤流失量监测的精度。

1. 算法的可靠性 算法本身的可靠性, 主要决定于组成算法的各算式的可靠性。本文主要讨论地形因子算式的可靠性。

(1) 坡度因子算式的可靠性。初步建立的坡度因子算式(3)、(3)'和(4)、(4)', 将其用于诞生地无疑是适用和可靠的。它们可否广泛应用于其它类似地区, 还有待进一步验证。随着土壤流失量实测方法的统一和实测数据量的增加, 坡度因子算式必将会改进和完善。

1) 唐万龙、卜兆宏: 像元地形因子算法软件的编制要点。(手稿)

然而,在属均质土的红壤微流域和黄绵土区的小流域应用中选用了(3)'式,在含砂石非均质土的棕壤性土径流小区和栗钙土区的小流域应用中选用了(4)'式,取得了良好效果。其

表 1 1号和 24 号水流方向线上各象元的坡度 θ_i 、坡长 l_i 及其因子 S_i 、 L_i 值下相应图斑的 θ_0 、 l_0 、 S_0 、 L_0 值

Table 1 The slope θ_i , slope-length l_i and their factor values of pixels in the first and 24th water flow directions of and the θ_0 , l_0 , S_0 and L_0 values in the 1st and 24th contours.

水流方向线号或图斑号 No. of water flow direction or contour	象元号 No. of pixel	坡度 θ_i Slope (°)	坡长 l_i Slope length (m)	坡度因子 S_i Slope factor	坡长因子 L_i Slope-length factor	流失量 A_i Soil loss (t/km ² ·y)	图斑 A_0 与象元 A_i 值间的精度 Accuracy between A_0 and A_i
1	1	6.0545	1.4221	1.0849	0.2535	3310	
1	2	14.5742	1.0332	2.3234	0.4426	12376	
1	3	5.1430	1.0040	1.0000	0.5477	6591	
1	4	8.5308	1.0112	1.3537	0.6345	10336	
1	5	18.2629	1.0530	3.2308	0.7124	27697	
1	6	21.3058	1.0734	4.2407	0.7847	40045	
1	7	15.1096	1.0358	2.4373	0.8503	24940	
1	8	11.5005	1.0538	1.7792	0.9107	19499	
象元各值总和 Sum of values		100.4813	8.6865	17.4628	5.1364	144794	
各值的均值 Mean of values		12.56	/	2.1828	0.6420	18099.25	100.0%
L_i 加权均值 Weighing mean of L_i					0.6265		
1	图斑(1)	θ_0 12.56	l_0 8.6205	S_0 1.9406	L_0 0.6241	A_0 14574.59	80.53%
	(2)	/	8.6865	2.1828	0.6265	16456.64	90.92%
24	1	9.6317	1.4344	1.4937	0.2546	4756	
24	2	15.7932	1.4697	2.5909	0.4673	14570	
24	3	28.8108	1.1413	8.2942	0.5937	59258	
24	4	6.2773	1.0060	1.1068	0.6797	9053	
24	5	0.0000	1.0000	0.6315	0.9099(0.7510)	6915	
24	6	5.7106	1.0050	1.0521	0.8161	10333	
24	7	12.9528	1.0261	2.0099	0.8771	21214	
24	8	14.0362	1.0308	2.2143	0.9348	24909	
象元各值总和 Sum of values		93.2126	9.1133	19.3934	5.5332	150828	
各值的均值 Mean of values		11.65	/	2.4242	0.6916	18853.50	100.0%
L_i 的加权值 Weighing mean of L_i					0.6591(0.6417)		
24	图斑(1)	θ_0 11.65	l_0 9.0112	S_0 1.7890	L_0 0.6381	A_0 13737.42	72.87%
	(2)	/	9.1133	2.4242	0.6417	18720.03	90.29%

续表 1

水流方向线号或图斑号 No. of water flow direction or contour	像元号 No. of pixel	坡度 θ_i Slope ($^{\circ}$)	坡长 l_i Slope length (m)	坡度因子 S_i Slope factor	坡长因子 L_i Slope-length factor	流失量 A_i Soil loss ($t/km^2 \cdot y$)	图斑 A_0 与象 元 A_i 值间的 精度 Accuracy between A_0 and A_i
微流域实测土壤流失量 A_0 Actual soil loss measured in microvalley						20273.8	100.0%
微流域土壤流失量监测值 \bar{A}_i Soil loss monitored by using terrain factors of GIS pixells in microvalley						(\bar{A}_i) 19795.75	97.64%
全流域图斑	(1)	18.313	2.5156	3.2454	0.3372	13169.27	64.96%
	(2)	/	5.2485	4.5720	0.4870	26794.23	67.84%

中 14 个小区年流失量监测值与实测值比较的一致性为 70.86%—99.41%。若用(2)式,当坡度为 25° 时,因 S 为 13.67,比(3)式的 S (5.90) 或(4)式的 S (2.01) 大 2 倍或 6 倍多,效果就很不好。因此,(3)、(4)式比原算式较适用、可靠。

(2) 像元地形因子的可靠性。从表 1 可知,像元不同,其 S_i 、 L_i 是很不同的,尤其像元坡长相同而其 L_i 值往往差异很大。这些像元地形因子值是否可靠? 是必须研究和解答的问题。为此,将表 1 中各水流线 8 个像元的各值累加,并获得其均值和坡长因子的加权均值。同时,将水流线归为一图斑,并在同一图斑获得二套坡度、坡长及其因子和流失量值: 一套是全由像元平均坡度而来; 另一套是取自 8 个像元的平均坡度因子和由像元坡长总和按(7)式算得坡长因子值。从表 1 图斑栏中可知,后一套数据算得的图斑(2)流失量比前一套数据算得的图斑(1)流失量,更接近该图斑内像元平均流失量 \bar{A}_i ; 而且其坡长因子值与像元坡长因子的加权均值完全相等,当计算像元 L_i 时若所有像元的 m 相同的话。例如, 1 号水流线图斑, L_i 的加权均值和总坡长的 L_0 值都是 0.6265。24 号水流图斑中,第 5 号像元若 m 也与其它像元同为 0.5 (即 $L_i = 0.7510$) 时,两种坡长因子也都应为 0.6417。总之,后一套数据的流失量监测精度较高,尤其两种坡长因子完全相等的事实,则表明像元地形因子算法严密可靠。

2. 应用精度 算法应用于土壤流失量监测的精度,主要由应用结果中的像元流失量 A_i 图与实地流失状况的一致性和像元流失量平均值 \bar{A}_i 与实测值的一致性来说明。

(1) A_i 图与实地的一致性。在 A_i 图上,凡是坡度小的又处水流线起点的山脊像元的 A_i 值,总是较小;而凡是坡度大又处水流线末尾的坡脚像元 A_i 值,总是较大。就表 1 中列出的 A_i 值而言,也是如此。这与裸土区的流失实况是十分一致的。

(2) \bar{A}_i 值与实测值的一致性。在微流域出口处,设置了大沉沙池,所取得的 1989 年 3 月至 1990 年 2 月周年流失量实测值为 20273.8 吨/公里²·年。从应用结果可知,由按算法软件运算后打印出的 \bar{A}_i 值为 19795.75 吨/公里²·年,与实测值的一致性达 97.64%。如果把全微流域当作一个图斑处理,也有两套图斑地形因子值,但其与实测值的一致性均

较低(详见表 1),这也许是一个图斑的坡面极不规整,满足不了 USLE “需坡面规整”的应用要求之故。

3. 像元坡长因子对应用精度的影响 在应用结果中,列出了微流域的 L_i 变化范围为 0.21—1.73。表 1 中各像元的坡长值变化不大,且随着像元边长的增大或许可以认为是相等,但是其 L_i 值却随其所处水流线的位置不同而相差很大。在应用地形因子于流失量监测时,如果认为像元边长小(其实 TM 像元边长 30 米已很大)而不考虑像元坡长因子 L_i ^[5],或者认为其相等^[2],都将使应用精度大为降低。例如,不考虑 L_i (实即 $L_i = 1$),就会使流失量该小的微流域像元扩大了 4.76 倍,而该大的像元却缩小了 1.73 倍。若认为 L_i 相等,设等于由微流域像元边长求取的因子值 0.21,则除一部分山脊像元外,多数像元的 L_i 值被缩小了,最大缩小达 8.24 倍。因此,为确保流失量的监测精度,既不能忽视像元坡长因子,也不可视为相同的常数。

三、结 语

像元地形因子算法,由像元坡长坡度及其因子算式组成,它与图斑地形因子算法比运算量大和更复杂。按其各算式研制出的新软件,已在微流域、小流域和全县境的流失量监测中得到应用。应用结果表明,算法本身严密可靠和应用精度良好。在土壤流失量遥感监测中,既不可忽视 GIS 像元坡长因子,也不可视为相等的常数;否则将导致流失量监测的重大错误。

参 考 文 献

1. 卜兆宏、唐万龙等,1993: 像元坡度新算法的初步研究。遥感技术与应用,第 8 卷 1 期,1—7 页。
2. 崔伟宏、黄秀华等, 1988: 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, 290—299 页,科学出版社。
3. Hession, W. C. and V. O. Shanholtz, 1988: A geographic information system for targeting nonpoint-source agricultural pollution, *J. of Soil and Water Conservation*, 43(3):264—266.
4. Kirkby, M. J. and R. C. P. Morgan, 1980: *Soil Erosion*. John Wiley & Sons Ltd.
5. Petersen, G. W. and J. M. Hamlett et al, 1991: Evaluation of Agricultural Nonpoint Pollution Potential in Pennsylvania Using a Geographic Information System. Environmental Resources Research Institute, ER9105, Uni. Park, PA.
6. Ripple, B. J., et al, 1982: Remote sensing and computer modeling for water quality planning in South Dakota, in *Remote Sensing for Resource Management*, pp. 309—316, SCSA, Iowa, 50021.
7. Wischmeier, W. H. and D. D. Smith, 1978: Predicting Rainfall erosion losses—a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook 537*, U. S. Department of Agriculture, Washington, D. C. pp. 58.

ALGORITHM OF TERRAIN FACTORS OF GIS PIXIL IN MONITORING SOIL LOSS BY REMOTE SENSING*

Bu Zhaohong, Tang Wanlong and Pan Xianzhang
(*Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing, 210008*)

Summary

Algorithm of terrain factors of GIS pixel is the key technique in monitoring soil loss by remote sensing. The principle, the applied process and the applied results of this algorithm are introduced and its applied accuracy is discussed in this article. Although the algorithm of terrain factors of GIS pixel is more complicated, and its calculation is more complicated than that of contour terrain factors, it is more dependable, automatic and of a higher accuracy than the latter algorithm. Neglecting the slope-length factor of pixel or regarding it as the same constant value due to similar slope lengths of pixels would lead to bad mistakes in the soil loss monitoring.

Key words Soil loss, Terrain factor of pixel, Slope-length factor

*The Project Supported by National Natural Science Foundation of China.