

黄土地区土壤侵蚀强度模型分析

付 炜

(新疆大学电子信息科学系 乌鲁木齐 830046)

摘 要 本文介绍了黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀强度的模糊分析模型的构造原理和方法。利用模糊子集的理论建立了土壤侵蚀强度分级的隶属函数,构造了土壤侵蚀强度计算表,用该表计算得出了土壤侵蚀强度指数,并用模糊相容度的原理对土壤侵蚀强度进行分等定级。用该模型对陕北安塞县的土壤侵蚀进行了试验研究。试验结果表明,该模型的预测精度较高,能客观地反映黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀强度的动态变化。

关键词 土壤侵蚀强度,模糊分析模型

1 引言

黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀强度的研究和土壤侵蚀强度图的编制是进行水土保持规划、制定合理土地利用方案的前提。而传统的研究方法则需要进行大量的野外调查和资料的搜集工作。在对土壤侵蚀影响因子综合分析的基础上,进行信息复合,绘制成图。因此专业人员的实践经验的丰富程度就决定了土壤侵蚀强度图的制图精度。为消除人为因素的影响,在进行黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀定量分析中,以陕北安塞县为试验区,以彩红外航空像片为主要信息源,提取土壤侵蚀类型信息。在此基础上利用模糊数学的理论和方法,构造了土壤侵蚀强度分等定级的模糊分析模型,并用该模型计算得出了试验区土壤侵蚀强度分布图,为黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀强度的研究寻求了一种定量化分析的新方法。

2 土壤侵蚀类型的遥感解译

通过分析安塞县有关土壤侵蚀定量观测数据和资料,根据水电部标准水土保持技术规范 and 试验规范的规定,确定出表1所示的土壤侵蚀影响因子及侵蚀强度划分标准。在比例尺1:5万的彩红外航空像片上,根据侵蚀地貌形态,土壤特征,植被分布,土壤侵蚀发育过程以及影像的色调、图形结构和形态特征差异,将试验区的土壤侵蚀划分为以下4个类型:①鳞片状侵蚀类型;②面状侵蚀类型;③浅沟侵蚀类型;④切沟侵蚀类型。其相应的侵蚀地貌类型及其在彩红外像片上的影像特征如表2。

收稿日期:1995年2月6日;收到修改稿日期:1995年5月4日

表 1 安塞县土壤侵蚀因子及侵蚀强度分级表

Table 1 A graded table of soil erosion factors and erosion intensity in Ansai County

指标 强度级别	因子及其 权重	降雨量 (mm) 0.2765	降雨强度 (mm/h) 0.2730	坡 度 (度) 0.2159	植被覆盖度 (%) 0.1349	沟谷密度 (km/km ²) 0.0558	相对高差 (m) 0.0368	地面 粗糙度 0.0071
I 轻度侵蚀		<200	<5	<3	>80	<5	<50	<1.5
II 中度侵蚀		200—300	5—10	3—6	60—80	5—15	50—100	1.5—2.0
III 较强侵蚀		300—400	10—15	6—15	40—60	15—25	50—100	2.0—2.5
IV 强度侵蚀		400—500	15—20	15—30	20—40	25—35	100—200	2.5—3.0
V 极强度侵蚀		500—600	20—25	30—60	5—20	35—50	100—200	3.0—5.0
VI 剧烈侵蚀		>600	>25	>60	<5	>50	>200	>5.0

表 2 安塞县土壤侵蚀类型及侵蚀强度分级表

Table 2 A graded table of soil erosion pattern and erosion intensity in Ansai County

土壤侵蚀强度及 最大侵蚀模数	侵蚀地貌类型	含 义	彩红外像片影像特征
I 轻度侵蚀 (<1000t/km ² ·a)	11 梁峁梯地轻度面状侵蚀 12 宽平梁峁轻度面状侵蚀 13 梁峁坡高覆被轻度面状侵蚀	指峁顶及坡面水平梯田 指残源面或宽长形涧地 植被覆盖度大于 90%	地埂阴影呈纹状排列,地面 平整地块清晰,无地埂呈暗 红色,紧密粒状结构,边界清 晰
II 中度侵蚀 (1000—2500 t/km ² ·a)	21 缓坡耕地,中度鳞片状侵蚀 22 梁峁坡高中覆被中度鳞片状侵蚀	一般坡度为 5°—8°的耕地 植被覆盖度 70—90%	地块清晰,地埂不显,沿坡展 布呈鲜红色,较紧密粒状结 构,边界清晰
III 较强侵蚀 (2500—5000 t/km ² ·a)	31 较缓坡耕地,较强鳞片状侵蚀 32 梁峁坡中覆被较强鳞片状侵蚀	一般坡度为 8°—15°的耕地 植被覆盖度 50—70%	地埂纹理清楚,且无规则呈 浅红色,疏松不均,边界清 晰
IV 强度侵蚀 (5000—8000 t/km ² ·a)	41 较陡坡耕地,强度浅沟侵蚀 42 梁峁坡中低覆被,强度浅沟侵蚀	一般坡度为 15°—25°的耕地 植被覆盖度 30—50%	无地埂纹理,顺坡耕作呈淡 红色,间夹零星地块
V 极强度侵蚀 (8000—15000 t/km ² ·a)	51 陡坡耕地,极强度浅沟侵蚀 52 梁峁坡低覆被,极强度浅沟侵蚀	一般坡度为 25°—35°的耕地 植被覆盖度 10—30%	呈米黄色,顺坡展布色调浅 淡,呈斑点状散布
VI 剧烈侵蚀 (15000—25000 t/km ² ·a)	61 极陡坡耕地,剧烈切沟侵蚀 62 梁峁急陡坡低覆被剧烈切沟侵蚀	一般为坡度大于 35°的耕地 植被覆盖度小于 10%	呈米黄色,间夹切沟纹理切 沟纹理明显,植被色调不显

3 模糊分析模型的构造原理^[1]

3.1 模糊全序关系

设对 n 个土壤侵蚀分类单元 $A_i(i = 1, 2, \dots, n)$ 进行侵蚀强度分级,则论域 U 为集合

$$U = \{A_1, A_2, \dots, A_n\} \tag{1}$$

其中 U 中的每个分类单元在侵蚀强度上的强弱可以看作受表 1 所列 7 个因子的影响。不

失一般性, 设对某个分类单元进行侵蚀强度等级划分, 所考虑的因子有 p 个, 即 F_1, F_2, \dots, F_p 。而每个因子又有 m_i 个离散化的状态集, 记为 V_1, V_2, \dots, V_p 其中 $V_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im_i}\}$ ($i = 1, 2, \dots, p$), 称为第 i 个因子的指标状态集。如在表 1 中, $m_i = 6, p = 7$, 每个因子 F_i ($i = 1, 2, \dots, 7$) 都有 6 个离散化的状态向量, 如 $V_3 = \{<3, 3-6, 6-15, 15-30, 30-60, >60\}$ 。假定每个因子的指标状态集都有一个全序集 $V_i = (V_i, <)$, 且满足 $v_{i1} > v_{i2} > \dots > v_{im_i}$ 。因此, 若只考虑一个因子 F_i ($i = 1, 2, \dots, p$) 时, 要求上述全序关系具这样的含义: 设 A_i 与 A_{i+1} 是两个待分等定级的土壤侵蚀强度分类单元, 若只考虑一个因子 F_i 时, A_i 处于状态 v_{ij1} , 而 A_{i+1} 处于状态 v_{ij2} 。当 $v_{ij1} > v_{ij2}$ 时(此处“ $>$ ”表示优于), 则 A_i 在侵蚀强度上优于 A_{i+1} 。如只考虑坡度因子 F_3 时, 分类单元 A_3 处于状态 v_{31} (坡度 $<3^\circ$), 而分类单元 A_4 处于状态 v_{32} (坡度 5°)。因 $v_{31} > v_{32}$ (“ $>$ ”指优于), 故 A_3 应为 I 级(轻度侵蚀), A_4 为 II 级(中度侵蚀)。用 $V_i(A_i)$ 表示对象 A_i 在因子 F_i 影响下的状态, 因此对任一分类单元 $A_i \in U$ 都可以用一组状态向量(或状态集合) $\{V_1(A_i), V_2(A_i), \dots, V_p(A_i)\}$ 去描述。

3.2 模糊子集及隶属函数

设 $U = \{A_i, i \in T\}$ (T 为指标集) 是进行级别划分的对象集, 要将它们分为 k 个级别。首先从 U 中选出 k 个分级对象 A_1, A_2, \dots, A_k , 要求对任意的 $1 < i < p$ 都有

$$V_i(A_1) > V_i(A_2) > \dots > V_i(A_k)$$

其中 A_1, A_2, \dots, A_k 称为参考对象(或典型对象); 它们所对应的状态向量称为参考向量。然后建立参考对象的隶属函数。土壤侵蚀强度的级别划分就是要区分它们的等级差别, 但这种等级差别并没有明显的界限。如土壤的较强侵蚀与强度侵蚀之间并没有截然分明的界限, 而常常表现为渐变的过程, 即具有一定的模糊性。因此它是论域 U 上的一个模糊子集, 记作 N 。要确定参考对象 A_j 的等级, 必须确定 N 的隶属函数, 然后由 $\mu_N(A_j)$ 的大小来计算 A_j 的等级。这里 $\mu_N(A_j)$ 称为对象 A_j 的隶属度, 其大小表示 A_j 属于等级 j 的程度 ($j = 1, 2, \dots, k$)。参考对象的隶属度可由专家评定、经验判断或理论推算得出:

$$\mu_N(A_j) = p_j \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (2)$$

其中 $p_j \in [0, 1]$ 是 $\mu_N(A_j)$ 的一种数量表示。

对参考对象进行等级划分与分级指标的权重关系极大, 因而必须确定分级指标的权重分配。权重分配相当于考虑问题的着眼点, 它是因子集 $\{F_1, F_2, \dots, F_p\}$ 上的一个模糊子集, 记为 C , 其归一化的权重分配记为

$$C(\text{权重分配}) = \frac{\alpha_1}{F_1} + \frac{\alpha_2}{F_2} + \dots + \frac{\alpha_p}{F_p} \quad (3)$$

$$\left(\alpha_i > 0, \text{ 且 } \sum_{i=1}^p \alpha_i = 1, \text{ 并选定 } \alpha_1 > \alpha_2 > \dots > \alpha_p \right)$$

其中 α_i ($i = 1, 2, \dots, p$) 称为第 i 个分级指标的权重, 其大小可由层次分析法来确定。

3.3 分级指数与模糊相容度

由参考对象的隶属度 p_j ($j = 1, 2, \dots, k$) 和分级指标的权重向量 α_i ($i = 1, 2, \dots,$

p) 确定参考向量的分级指数矩阵 Λ :

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \alpha_1 p_1 & \alpha_2 p_1 & \cdots & \alpha_p p_1 \\ \alpha_1 p_2 & \alpha_2 p_2 & \cdots & \alpha_p p_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_1 p_k & \alpha_2 p_k & \cdots & \alpha_p p_k \end{bmatrix} \quad (4)$$

这里 Λ 阵的行向量就是 k 个参考向量的一种数量表示。

若将评级对象 A_i 看作因子空间 $F = \{F_1, F_2, \cdots, F_p\}$ 中的一个点, 则矩阵 Λ 的列向量的各个分量就是 k 个参考对象的隶属度 p_j 在子空间 F_i 上的一种映射。因此它的列数对应于 F_i 的个数, 它的行数对应于 F_i 的状态集 v_{ij} 的个数 m_i 。如果 $k = m_i$, 或阵 Λ 一般不需要改进; 如果 $k > m_i$, 则必然有 F_i 的某一个状态集 v_{ij} 对应于 Λ 矩阵中的第 i 列中两个或两个以上的分量值。为了使一个状态对应于一个分量值, 可取它们的算术平均值作为 v_{ij} 的对应值; 如果 $k < m_i$, 可将 F_i 的 m_i 个状态归并为 k 个状态。这样就将矩阵 $\Lambda = (\lambda_{ij})$ 改进为 $\Lambda' = (\lambda'_{ij})$, 相应的参考对象 A_i 的隶属度也变为

$$p_j = \sum_{i=1}^p \lambda'_{ij}$$

为了使级别评定更加准确, 矩阵 Λ' 还需进一步改进成 $\Lambda'' = (\lambda''_{ij})$ 。这是因为模糊集 N 在 F_i 上的映射是论域 V_i 上的一个模糊子集, 记作 V_i 。当将 V_i 离散化为 $V_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \cdots, v_{imi}\}$ 后, 相应的 V_i 也被离散化为论域为 v_{ij} 的模糊子集 $v_{ij}(j = 1, 2, \cdots, m_i)$, 则它们具有性质 $\mu_{v_{ij_1}}(x) > \mu_{v_{ij_2}}(x) (j_1 < j_2)$, 且 $\mu_{v_{ij}}(x)$ 是单调减少的。矩阵 Λ' 中的 λ'_{ij} 实际上是论域 v_{ij} 上 $\mu_{v_{ij}}(x)$ 的算术平均值, 也是离散化后 v_{ij} 的隶属度, x 为隶属函数变量。

在实际评定级别时, 评价对象 A 所处的状态 $V_i(A)$ 往往不是标准标态(即对任一参考对象 A_i , $V_i(A) \neq V_i(A_i)$)。例如当 A_1 处于状态 v_{32} (如坡度为 6°), A_2 处于状态 v_{33} (如坡度为 7°), 这时就 F_3 而言, 虽然 A_1 优于 A_2 , 但实际上差别很小。如果用 $\alpha_3 p_2$ 和 $\alpha_3 p_3$ 去分别代表 v_{32} 和 v_{33} , 则将对 A_1 和 A_2 的等级评定带来很大的误差。因此, 根据 v_{ij} 的性质, 在可能的情况下, 用适当的函数来近似地表示 v_{ij} 的隶属函数, 如用线性函数表示:

$$\mu_{v_{ij}}(x) = \frac{1}{100} (ax + b) \quad (x \in v_{ij}) \quad (5)$$

并用此类线性函数代替 Λ' 中的部分 λ'_{ij} (如选 $i = 1, 2, \cdots, m_i; j = 1, 2, \cdots, k$ 中的部分值), 于是得到一个新的指数矩阵 $\Lambda^* = (\lambda^*_{ij})$ 。

设 $A \in U$ 为任一评价对象, $V_i(A) = v_{ij}$, 根据矩阵 $\Lambda^* = (\lambda^*_{ij})$, 定义评价对象 A 的隶属度为

$$\mu_N(A) = \sum_{i=1}^p \lambda^*_{iii} \quad (6)$$

根据 $\mu_N(A)$ 和 p_i 定义评价对象 $A \in U$ 的模糊相容度为

$$W_A(A_i) = 1 - |\mu_N(A) - p_i| \quad (7)$$

若 $W_A(A_i) = \max_{1 < j < k} W_A(A_j)$, 便将评价对象 A 归于参考对象 A_i 一类, 即 A 被评判为第 i 级。

4 土壤侵蚀强度的等级评判

4.1 参考对象及其隶属度的确定

若被评价的对象集 $U = \{A_i, i \in T\}$ (T 为指标集) 中的元素是某种侵蚀类型的分类单元, 根据表 1, 有 7 个评价因子, $F_1 =$ 降雨量, $F_2 =$ 降雨强度, \dots , $F_7 =$ 地面粗糙度, 且每个评价指标的离散化的状态集 $V_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{imi}\}$ 都按某种优劣性质构成全序集 $V_i = (V_i, <)$, 且满足 $v_{i1} > v_{i2} > \dots > v_{imi}$ 。在本试验中要求将土壤侵蚀强度划分为 6 个等级, 故对每个因子亦分为 6 个等级。亦即从 U 中选出 6 个参考对象 A_1, A_2, \dots, A_6 , 它们的参考向量满足 $V_i(A_1) > V_i(A_2) > \dots > V_i(A_6)$ 。为了确定矩阵 A , 首先需要确定参考对象 A_j 的隶属度 p_j 。由表 1 可看出, 论域 U 上的“强、弱”性质这一模糊子集 N , 由强到弱其隶属函数 $\mu_N(A)$ 是递增的, 而参考向量的隶属度可按等差数列划分为 6 级, 取其中心值扩大 100 倍后得 $p_1 = 91.667$, $p_2 = 75.00$, $p_3 = 58.333$, $p_4 = 41.667$, $p_5 = 25.00$, $p_6 = 8.333$ 。

4.2 矩阵 A 的确定

为确定矩阵 A , 需求出 A 中的参考向量 $(\alpha_1 p_i, \alpha_2 p_i, \dots, \alpha_7 p_i)$ ($i = 1, 2, \dots, 6$)。从表 1 中可看出, 评价的指标项是因子集 $\{F_1, F_2, \dots, F_7\}$ 上的一个模糊子集。因各评价因子在土壤侵蚀强度等级评定中所起的作用不同, 即 $(\alpha_1 p_i, \alpha_2 p_i, \dots, \alpha_7 p_i)$ 中的每个分量所代表的因子(在此称为强度因子)对 A_j 的影响程度不同, 故各评价因子的权重 $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_7)$ 就需用某种方法来计算。7 个因子对应的权重组成的权重分配向量 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_7)$ 对 $\forall \alpha_i (i = 1, 2, \dots, 7)$, α_i 满足 $\alpha_i \in [0, 1]$, 且 $\sum_{i=1}^7 \alpha_i = 1$ 。故

$$C(\text{权重分配}) = \frac{\alpha_1}{F_1} + \frac{\alpha_2}{F_2} + \dots + \frac{\alpha_7}{F_7}$$

本试验用层次分析法^[2]求得各评价因子的归一化的权重向量 $\alpha = (0.2765, 0.2730,$

表 3 安塞县土壤侵蚀强度指数表

Table 3 An index table of soil erosion intensity in Ansai County

因子及其 λ 值 强度级别	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	P_i
	0.2765	0.2730	0.2159	0.1349	0.0558	0.0368	0.0071	
I 轻度侵蚀	25.35	25.02	19.79	12.37	5.12	3.37	0.65	91.667
II 中度侵蚀	20.74	20.48	16.19	10.12	4.19	2.76	0.53	75.000
III 较强侵蚀	16.13	15.92	12.59	7.87	3.25	2.15	0.41	58.333
IV 强度侵蚀	11.52	11.38	9.00	5.62	2.33	1.53	0.30	41.667
V 极强度侵蚀	6.91	6.83	5.40	3.37	1.40	0.92	0.18	25.000
VI 剧烈侵蚀	2.30	2.27	1.80	1.12	0.46	0.31	0.06	8.333

0.2159, 0.1349, 0.0558, 0.0368, 0.0071)。根据 $(\alpha_1 p_i, \alpha_2 p_i, \dots, \alpha_7 p_i)$ ($i = 1, 2, \dots, 6$) 可得出矩阵 A , 具体算出后列于表 3。表中第 i 个参考向量的第 j 个分量 $\alpha_j p_i$ 就是强度因子 F_j ($j = 1, 2, \dots, 7$) 在第 i ($i = 1, 2, \dots, 6$) 个等级上的强度指数。参考向量 A_i 的各个分量之和 $\sum_{j=1}^7 \alpha_j p_i$ (参考对象的隶属度扩大 100 倍) 恰好就是第 i 个等级上的强度指数。强度指数的大小标志着对应于该等级上土壤侵蚀强度的强弱。

4.3 矩阵 A 的改进

将矩阵 A 改进为 A^* , 从而对任一分类单元 $A \in U$ 求出 $\mu_N(A)$ 及其对 p_i 的相容度, 进而得出 A 所属的等级。将表 1 和表 3 合在一起, 得到表 4。在表 4 中, 因为 $v_{62} = v_{63}$, $\alpha_6 p_2 = 2.76$, $\alpha_6 p_3 = 2.15$, 故用 $\frac{1}{2} (2.76 + 2.15) = 2.455$ 分别代替 2.76 和 2.15。又因 $v_{64} = v_{65}$, $\alpha_6 p_4 = 1.53$, $\alpha_6 p_5 = 0.92$, 故用 $\frac{1}{2} (1.53 + 0.92) = 1.225$ 分别代替 1.53 和 0.92 等等。这样得到矩阵 $A' = (A'_{ij})$, 相应的参考对象的隶属度 p_i (扩大 100 倍) 也变为 $p'_1 = 91.667$, $p'_2 = 74.705$, $p'_3 = 58.625$, $p'_4 = 41.375$, $p'_5 = 25.315$, $p'_6 = 8.333$, 如表 5 所列。为消除土壤侵蚀强度等级评定的误差, 将权重较大的评价指标的 μ_{gij} 分别用

表 4 安塞县土壤侵蚀强度标准, 强度指数对照表

Table 4 A contrast table of intensity standards and intensity indexes for soil erosion in Ansai County

因子及其权重 指标及 λ 值 强度级别	降雨量 (mm) 0.2765	降雨强度 (mm/h) 0.2730	坡度 (度) 0.2159	植被覆盖 度(%) 0.1349	沟谷密度 (km/ km ²) 0.0558	相对高差 (m) 0.0368	地面粗 糙度 0.0071	P_i
I 轻度侵蚀	<200 25.35	<5 25.02	<3 19.79	>80 12.37	<5 5.12	<50 3.37	<1.5 0.65	91.667
II 中度侵蚀	200—300 20.74	5—10 20.48	3—6 16.19	60—80 10.12	5—15 4.19	50—100 2.76	1.5—2.0 0.53	75.000
III 较强侵蚀	300—400 16.13	10—15 15.92	6—15 12.59	40—60 7.87	15—25 3.25	50—100 2.15	2.0—2.5 0.41	58.333
IV 强度侵蚀	400—500 11.52	15—20 11.38	15—30 9.00	20—40 5.62	25—35 2.33	100—200 1.53	2.5—3.0 0.30	41.667
V 极强度侵蚀	500—600 6.91	20—25 6.83	30—60 5.40	5—20 3.37	35—50 1.40	100—200 0.92	3.0—5.0 0.18	25.000
VI 剧烈侵蚀	>600 2.30	>25 2.27	>60 1.80	<5 1.12	>50 0.46	>200 0.31	>5.0 0.06	8.333

线性函数来代替。如表 5 中的 μ_{gij} ($i = 1, 2, 3, 4; j = 2, 3, 4, 5$) 分别用线性函数

$\frac{1}{100} f_{ij}(x)$, $x \in g_{ij}$ 来代替。其中

$$f_{12}(x) = 10.37 - 0.0288x, \quad 200 \leq x \leq 300;$$

表 5 安塞县土壤侵蚀强度计算表
Table 5 A computing table of soil erosion intensity in Ansai County

因子及其权重 指标及 λ 值 强度级别	降雨量 (mm) 0.2765	降雨强度 (mm/h) 0.2730	坡度(度) 0.2159	植被覆盖度 (%) 0.1349	沟谷密度 (km/km ²) 0.0558	相对高差 (m) 0.0368	地面粗糙度 0.0071	P_i
I 轻度侵蚀	<200 $f_{11} = 25.35$	<5 $f_{21} = 25.02$	<3 $f_{31} = 19.79$	>80 $f_{41} = 12.37$	<5 $f_{51} = 5.12$	<50 $f_{61} = 3.37$	<1.5 $f_{71} = 0.65$	91.667
II 中度侵蚀	200—300 20.74 $f_{12} = 10.37$ — 0.0288x	5—10 20.48 $f_{22} = 28.425$ — 0.5675x	3—6 16.19 $f_{32} = 52.61$ — 2.85x	60—80 10.12 $f_{42} = 3.37$ + 0.1125x	5—15 $f_{52} = 4.19$	50—100 $f_{62} = 2.455$	1.5—2.0 $f_{72} = 0.53$	74.705
III 较强侵蚀	300—400 16.13 $f_{13} = 32.265$ — 0.0461x	10—15 15.92 $f_{23} = 25.00$ — 0.7567x	6—15 12.59 $f_{33} = 40.7$ — 0.865x	40—60 7.87 $f_{43} = 3.01$ + 0.1184x	15—25 $f_{53} = 3.25$	50—100 $f_{63} = 2.455$	2.0—2.5 $f_{73} = 0.41$	58.625
IV 强度侵蚀	400—500 11.52 $f_{14} = 18.569$ — 0.0164x	15—20 11.38 $f_{24} = 20.48$ — 0.5687x	15—30 9.00 $f_{34} = 42.20$ — 0.965x	20—40 5.62 $f_{44} = 3.49$ + 0.1066x	25—35 $f_{54} = 2.33$	100—200 $f_{64} = 1.225$	2.5—3.0 $f_{74} = 0.30$	41.375
V 极强度侵蚀	500—600 6.91 $f_{15} = 9.993$ — 0.0384x	20—25 6.83 $f_{25} = 24.272$ — 0.7583x	30—60 5.40 $f_{35} = 31.65$ — 0.543x	5—20 3.37 $f_{45} = 2.62$ + 0.15x	35—50 $f_{55} = 1.40$	100—200 $f_{65} = 1.225$	3.0—5.0 $f_{75} = 0.18$	25.315
VI 剧烈侵蚀	>600 $f_{16} = 2.30$	>25 $f_{26} = 2.27$	>60 $f_{36} = 1.80$	<5 $f_{46} = 1.12$	>50 $f_{56} = 0.46$	>200 $f_{66} = 0.31$	>5.0 $f_{76} = 0.06$	8.333

$$\begin{aligned} f_{13}(x) &= 32.265 - 0.0461x, & 300 \leq x \leq 400; \\ &\vdots & \vdots \\ f_{35}(x) &= 2.62 + 0.15x, & 5 \leq x \leq 20. \end{aligned}$$

详见表 5。这样就得到矩阵 $A^* = (f_{ij})$ 。表 5 是将矩阵 A 和 A^* 合在一起构成的。

4.4 土壤侵蚀强度指数的计算和强度级别的评定

对某一评价对象,根据其各评价要素指标值,利用表 5 即可对任一分类单元的土壤侵蚀强度进行分等定级。例如,有一分类单元 A_g ,其 7 种强度指标(即单元 A_g 的一个状态向量)为:降雨量 450mm,降雨强度 18mm/h,坡度 25° ,植被覆盖度 30%,沟谷密度 20 km/km²,相对高差 120m,地面粗糙度 1.8。于是分类单元 A_g 的隶属度为

$$\begin{aligned} \mu_N(A_g) &= \frac{1}{100} [(18.569 - 0.0164x) + (20.48 - 0.5687x) \\ &\quad + (42.20 - 0.965x) + (3.49 + 0.1066x) + 3.25 \\ &\quad + 1.225 + 0.53] = 0.5120 \end{aligned}$$

其中 $f_{14}(450) = 11.189$, $f_{24}(18) = 10.243$, $f_{34}(25) = 18.075$, $f_{44}(30) = 6.688$, 于是分类单元 A_g 对 $p_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 的相容度(将 $\mu_N(A_g)$ 扩大 100 倍)为

$$W_A(A_i) = 1 - \frac{|51.20 - p_i|}{100} \quad (i = 1, 2, \dots, 6)$$

而 $W_A(A_3) = \max_{1 \leq i \leq 6} W_A(A_i) = 1 - \frac{|51.20 - 58.625|}{100} = 0.9258$ 因此分类单元 A_g 应评定为第 III 级,即较强侵蚀。

在彩红外航空像片上解译出不同土壤侵蚀类型的分类单元并编制土壤侵蚀类型图,将该图件与试验区的降雨量分布图,降雨强度分布图,植被覆盖度图一并输入计算机,并由数字高程模型(Digital Elevation Model——DEM)产生试验区的坡度图,沟谷密度,相对高差图和地面粗糙度图。在土壤侵蚀信息系统的支持下^[3],将上述 7 种图进行逻辑叠合处理,并用本文所述的模糊模型分析方法即可得出试验区内每一具体地块的土壤侵蚀强度等级。根据其所属的土壤侵蚀类型单元,即可得出如强度鳞片状侵蚀,中度面状侵蚀,剧烈浅沟侵蚀,极强度切沟侵蚀等不同类型的土壤侵蚀强度等级。

5 模型的试验与评价

5.1 模型的试验

5.1.1 试验区土壤侵蚀概况^[4]

安塞县是陕北黄土高原典型黄土丘陵沟壑区,是黄河中游重点水土流失治理区。该区年平均降雨量 505mm,降雨集中,6—9 月份降雨占全年的 74%,且暴雨频率高,7—9 月份暴雨占全年的 87%,同时期的输沙量占全年的 93%。区内沟谷纵横,地形破碎,平均沟谷密度 4.7km/km²,相对高差 100—200 米。本区主要土类为黄绵土,土质疏松,粉沙

含量高,抗侵蚀力差。区内土地贫瘠,耕作粗放,垦殖指数高,植被覆盖度低。以上因素导致了本区土壤侵蚀严重,多年平均输沙量 2388 万吨,输沙模数 $8373\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 。

5.1.2 试验结果分析

如上所述,安塞县的植被覆盖度较低,而土地的垦殖指数较高。区内沟谷密度大,平均地面坡度也较大,降雨集中,且多为暴雨。上述因素决定了该区为土壤侵蚀强烈地区。利用模糊分析模型对安塞县的土壤侵蚀强度进行了试验研究。计算结果表明,试验区大部分地块处于较强侵蚀和强度侵蚀,而轻度侵蚀和中度侵蚀的地块较少,这与实际情况是一致的。这也是黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀强度分布的一个特点。试验结果表明,土壤侵蚀强度的模糊分析模型能较客观、综合地反映试验区的土壤侵蚀强度差异。该分析模型的提出,为黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀强度分布规律的研究寻求了一种新的方法,从而为黄土地区土壤侵蚀的研究提供了一条定量化分析的途径。

5.2 模型的评价

土壤侵蚀强度的模糊分析模型是在土壤侵蚀信息系统和遥感技术的支持下,应用模糊数学的理论和方法建立起来的定量化分析模型。试验表明,该模型的预测精度较高,能客观地反映试验区土壤侵蚀强度的分布规律。模型算法简便、快速,耗费机时较少,宜于在微机上推广应用。利用该模型的计算结果,不仅可以用来绘制土壤侵蚀强度分布图,还可以作为计算土壤可侵蚀性因子的一个参数,为土壤侵蚀的计量研究提供一种定量化分析的手段。

由以上论述可以看出,应用模糊数学的原理和方法可以对带有精确值、区间值和语言值的土壤侵蚀强度分级指标进行统一的数值处理,从而对土壤侵蚀强度作出数值评价。只要评价因子和指标选取合理,同样可以得出合适的数学定义,因而得出的结果和传统的描述性以及用多元分析处理得到的结果更符合实际情况。当然作为大范围的应用,评价因子的选取和指标的规范化处理还有待进一步的研究。

随着模型的不断发展与逐步改进,可以预见,如将该模型的构造原理和方法与图像处理技术结合起来,对遥感影像进行数值处理,直接从遥感信息中提取土壤侵蚀强度信息,将使黄土丘陵沟壑区的土壤侵蚀预测与定量分析提高到一个新的水平。

参 考 文 献

- [1] 苑慎怀,李洪兴. 质量评价的模糊数学模型. 数学的实践与认识,1986,2(2): 9—12。
- [2] 毛厚高. 系统工程. 北京: 人民邮电出版社,1988,228—234。
- [3] 付伟. 黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀专家系统试验研究. 自然灾害学报,1993,2(1): 62—70。
- [4] 姜永清,武春龙等. 安塞县土壤侵蚀类型遥感调查制图. 黄土高原遥感调查研究. 北京: 科学出版社,1988,110—111。

The Model Analysis for Soil Erosion Intensity in Loess Regions

Fu Wei

(Department of Electronic & Information Science, Xinjiang University, Urumqi 830046)

Abstract This paper presents the approaches and principles for building Fuzzy analysis model of soil erosion intensity in hills and gullies of loess regions. With the theories of Fuzzy Subset, the author builds the attribute function of soil erosion intensity, and designs the computing table for soil erosion intensity. Using the computing table, the author obtains the indexes of soil erosion intensity and grades and classifies the intensity of soil erosion with the principles of Fuzzy compatibility degree. With the model the author makes the test researches on soil erosion in Ansai County, north of Shanxi Province. The test results show that the model has a high prediction precision, and can objectively reflect the dynamic states of soil erosion intensity in loess regions.

Key words Soil erosion intensity, Fuzzy analysis model