

文章编号: 1007-6301 (2003) 04-0388-12

隶属度判别法在水土流失快速评估中的应用

鞠文学, 李天宏, 倪晋仁

(北京大学环境工程系, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871)

摘 要: 引入隶属度判别法对水土流失快速评估方法进行改进。在 GIS 的支持下, 选取标准参照区域对反映水土流失状况的表现因子——输沙模数进行聚类, 建立标准参照组, 计算由各个环境因子特征值决定的水土流失对标准参照组的隶属度; 采用特尔菲法确定选取的环境因子对表现因子的影响权重向量; 对待测区域的环境因子进行分析, 确定待测区域对标准参照组的隶属度矩阵和标准化隶属度向量; 依据经验公式确定待测区域的输沙模数。以陕西省安塞县纸坊沟小流域为例进行了方法应用, 结果表明该方法在小流域尺度上对输沙模数有较好的预测精度和较快的预测速度。

关 键 词: 隶属度判别法; 快速评估; 水土流失

中图分类号: S157.1; TP79

侵蚀模型是水土流失监测和预报的重要工具。根据建模手段和方法的差异, 现有的模型大致可以分为: 统计分析模型、物理成因模型^[1]。以 USLE^[2,3] 为代表的统计分析模型在大量小区试验的基础上, 通过对水土流失影响因素的统计分析建立了完善的数学方程, 在沟坡尺度上取得了良好的应用效果。然而在应用到中、大尺度时, 由于 USLE 的很多重要参数都需要依据经验估算, 导致了模型结果不精确。此外, 近年来提出的遥感信息模型^[4]和人工神经网络模型^[5]也多属于统计分析模型。前者通过利用遥感技术提取影响水土流失的主要因子, 结合统计分析模型或者侵蚀机理模型的理论建立评估预测模型, 可应用于中大尺度的水土流失定量评估, 其中遥感技术只是作为信息提取的手段, 并没有在评估方法上取得明显突破; 后者的应用途径和效果还处在探索阶段。基于沟坡尺度上的水土流失过程机理分析的物理成因模型 (如 CREAMS^[6]、WEPP^[7]、LISEM^[8]、自组织模型^[9]等) 还不能拓展应用到中大尺度进行水土流失预测。

上述进行水土流失绝对量评估或测算的模型, 往往由于资料不完备而限制了其应用推广。针对绝对量评估缺乏充分资料的现实条件, 最近有学者基于土地利用结构变化和水土流失的内在关系, 借鉴水体水质生物快速评价的思想, 提出用土地利用结构进行水土流失动态变化的快速评估方法并取得了较好的应用效果^[10]。快速评估方法的一些步骤 (如参照组匹配) 可根据数据情况选择合适的方法; 要用于水土流失绝对量的估测也需要建立具体的数理判别模型。本文基于快速评估方法的框架, 在 GIS 支持下, 考虑主要环境因子, 以待测区的水土流失潜在程度为评估目标, 采用隶属度判别分析法, 对快速评估方法进行改

收稿日期: 2003-02; 修订日期: 2003-07

基金项目: 水利部黄河水利委员会水保基金资助

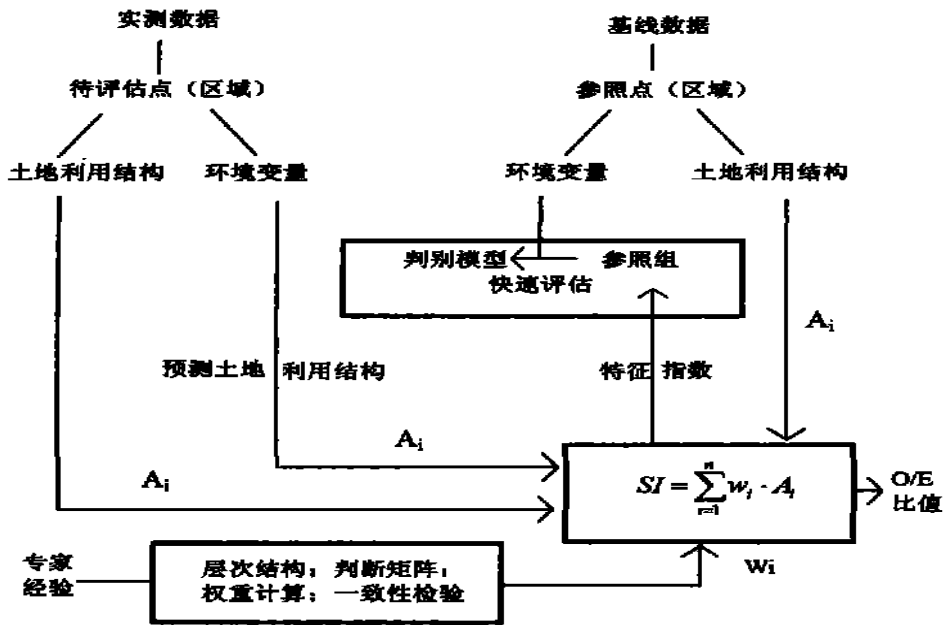
作者简介: 鞠文学 (1977-), 男, 硕士, 研究方向为水沙科学。Email: litianhong@iee.pku.edu.cn

进, 并应用于陕西省安塞县纸坊沟小流域进行水土流失绝对量的估测。

1 研究方法

1.1 水土流失快速评估方法简述

水土流失快速评估方法建立的前提是具有相似环境因子(包括自然环境因子和人类活动因子)的区域应该具有相似的水土流失状况(在黄河中游仍以输沙模数表征^[11])。在参照区域内的内部因子对于研究要求来说是均质的基本假设前提下, 以不同参照区域的土地利用结构特征值(SI)作为表征区域水土流失状况的指标, 以影响区域水土流失的地形因子、地表物质组成等因素作为环境变量, 通过参照点选择、参照组构建、参照组匹配等步骤预测待评估区域的土地利用结构, 进而确定该区域的水土流失状况, 并通过分析观测结果与预测结果的比值(O/E)进行水土流失变化趋势的预测^[10], 评估模型流程如图1所示。而如何有效进行水土流失绝对量的预测, 建立完善的数理判别模型仍是该模型有待完善的方面。



其中, A_i 为不同土地利用类型的面积, W_i 为不同土地利用类型对水土流失的影响权重, SI 为土地利用特征值, O/E 为 SI 的观测值和预测值之比。

图1 水土流失快速评估流程图^[10]

Fig.1 Flow chart of the rapid assessment approach of regional soil erosion

1.2 隶属度判别法对快速评估法的修正

基于隶属度的矩阵运算对水土流失快速评估方法中的相关环节进行修正将有助于解决上述问题。修正后的方法流程如图2所示。

(1) 依据输沙模数对标准参照区域进行分类或聚类分析, 以表现因子的欧氏距离定义

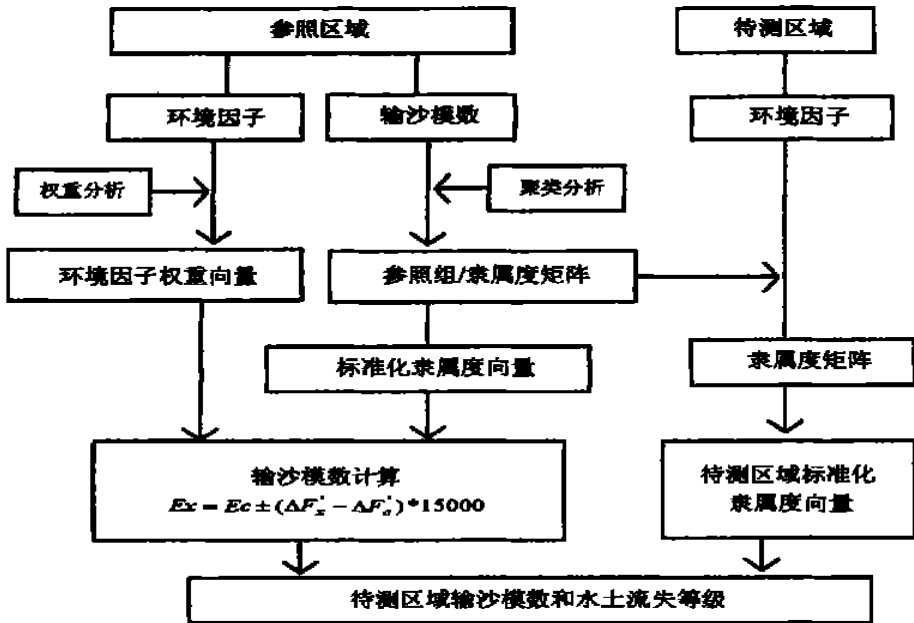


图 2 隶属度判别法流程图

Fig. 2 Flow chart of discriminance based on probabilities of group membership

聚类分析类别距离系数, 将标准参照区域划分为不同的参照组, 组内的输沙模数属于同一等级; 根据表现因子聚类结果对参照区域的某环境因子依据其大小顺序进行分类 (类别由低到高代表由其决定的水土流失程度加深), 类别数和每个类别包含的区域数量与标准参照组相同, 将其因子的特征值对其类别作隶属度判别分析, 得到每一个环境因子特征值对其类别的隶属度; 由于单一环境因子下的水土流失应该由该环境因子单独决定, 而输沙模数聚类结果和该环境因子等级分类结果完全相同, 因此, 上面得到的环境因子对类别的隶属度就是不同大小的该环境因子特征值对各级别的水土流失类型的隶属度, 对每一个环境因子进行这样的处理, 得到各环境因子的各个特征值对标准参照组的隶属度。该运算过程基于相同的其它环境变量下输沙模数对某环境变量特征值近似成线性相关的理论假设, 该假设可以通过 U S L E 方程的形式以及相关的研究^[12, 13]证明其合理性。

(2) 根据特尔菲法和经验判断, 结合环境因子特征值的提取和类别的划分确定各环境因子对水土流失的影响权重, 得到环境因子权重行向量 $\delta = (\delta_1, \delta_2, \delta_3 \dots \delta_n)$, 其中权重值 δ_i 代表环境因子 i 对水土流失的影响权重。

(3) 确定待测区域对标准参照组的隶属度矩阵 η

对于某一待测区域 S_x , 对于 S_x 的某个环境因子 F , 其特征值为 F_x , 察看标准参照组中该因子特征值集合 $\{...F_i...\}$, 从中找出与 F_x 最接近的两个, 以二者与 F_x 的距离为权, 将二者对标准参照组的隶属度进行加权平均, 计算由 F_x 决定的对标准参照组的隶属度;

对于 S_x 的每个环境因子都重复步骤, 即可得到 S_x 对标准参照组的隶属度矩阵 η

(4) 确定待测区域对标准参照组的标准化隶属度向量 β :

待测区域对标准参照组的隶属度的计算公式为 $\beta = \delta \cdot \eta$ 其中 η 是待测区域对标准参

照组的隶属度矩阵, δ 为环境因子权重行向量, β 为待测区域对标准参照组的隶属度向量。

由 $\beta = \delta \cdot \eta$ 得到待测区域对标准参照组的隶属度向量, 然后对隶属度向量作标准化处理, 得到标准化隶属度向量 β 。

标准化方法是, 对于隶属度向量 $(F_1, F_2, F_3 \dots F_n)$,

$$\text{令 } Y = \sum_{i=0}^n (i \cdot F_i), i = 1, 2, \dots, n$$

I 若 Y 的小数部分的十分位处于 $[0, 3]$ 或 $[7, 9]$ 区间, 则令 $Z = \text{Round}(Y)$, Round 是四舍五入取整函数;

II 若 Y 的小数部分的十分位处于 $[4, 6]$ 区间, 则令 $Z = \text{Int}(Y) + X$, Int 是向下取整函数, $X = 0$ (如果 $F_{\text{Int}(Y)} \geq 0.5$ 或者 $F_i < 0.5, i = 1, 2, \dots, n$) 或者 $X = 1$ (如果 $F_{\text{Int}(Y)+1} < 0.5$);

$$\text{III 令 } F_z = F_{z/2} + \sum_{j=1}^n F_j/2, \quad \text{令 } F_{z+1} = \sum_{j=z+1}^n F_j/2,$$

$$F_{z-1} = \sum_{j=0}^{z-1} F_j/2, F_k = 0, (k > j+1 \text{ 或 } k < j-1);$$

经过上述运算, 得到标准化隶属度向量 $\beta = (F_1, F_2, F_3 \dots F_n)$

(5) 根据待测区域对标准参照组的隶属度向量确定待测区域的水土流失等级及模数

Ex:

由标准化隶属度向量确定待测区域所属的水土流失参照组, 即得水土流失等级;

对于待测区域的标准化隶属度向量 $(F_1, F_2, F_3 \dots F_n)$, 其中的最大值为 F_i , 令 $\Delta F_x = F_{i+1} - F_{i-1}$; 待测区域所属参照组的标准值为 E_c 。计算标准参照组内各个区域的 ΔF , 通过移动平均算法, 计算 E_c 的 ΔF_c , 则待测区域的输沙模数为 $E_x = E_c \pm (\Delta F_x - \Delta F_c) \cdot 15000$ (注: 公式中的 15000 是通过对若干数据的统计分析得到的经验数值), 如果待测区域的水土流失级别 $1 < i < n$, 则公式中间取正号; 如果待测区域的水土流失级别 $i = 1$ 或者 $i = n$, 则根据标准参照组中相关数据的 E_i 随 $(\Delta F_x - \Delta F_c)$ 的变化趋势, 相应地确定公式中间的正负号。

2 应用: 纸坊沟流域水土流失评估

2.1 区域背景

纸坊沟是延河支流杏子河下游的一级支沟, 位于陕西省安塞县, 流域面积 8.27 km^2 , 地处东经 $109^\circ 14' 09'' \sim 109^\circ 16' 01''$, 北纬 $36^\circ 43' 11'' \sim 36^\circ 46' 25''$ 之间, 属于黄土丘陵沟壑区第二副区。流域内平均海拔 1200m 左右, 上下游高差 210m, 地貌为典型的梁峁状黄土丘陵地貌, 沟谷密集、地面起伏大。土壤类型单一, 以黄褐土为主。该流域处于森林草原地带, 为乔木落叶阔叶林北界, 现有植被以人工林为主。在气候上, 纸坊沟流域处于暖温带半湿润气候向半干旱气候的过渡带, 多年平均降水量为 542.5mm, 年内降水主要集中在 6~9 月, 多以暴雨形式出现。暴雨后, 产流集中, 挟沙量大, 易造成水土流失。根据把口站 1988~1990 年的资料, 年洪水流量平均为 $2.225 \times 10^5 \text{ m}^3$, 径流模数为 $2.78 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 年平均输沙模数为 $6397.7 \text{ t}/\text{km}^2$ ^[14]。

2.2 数据准备

本研究采用的数据为 1988 年的土壤图、土地利用图、地貌图、坡度图等。使用 GIS 软件 ArcInfo 8.01 和 ArcView 3.2 进行数据处理。为模型计算方便, 把流域划分成 17 个子流域 (图 3), 将子流域图和各个数据图层进行叠加, 得到以子流域为空间单元的信息图。

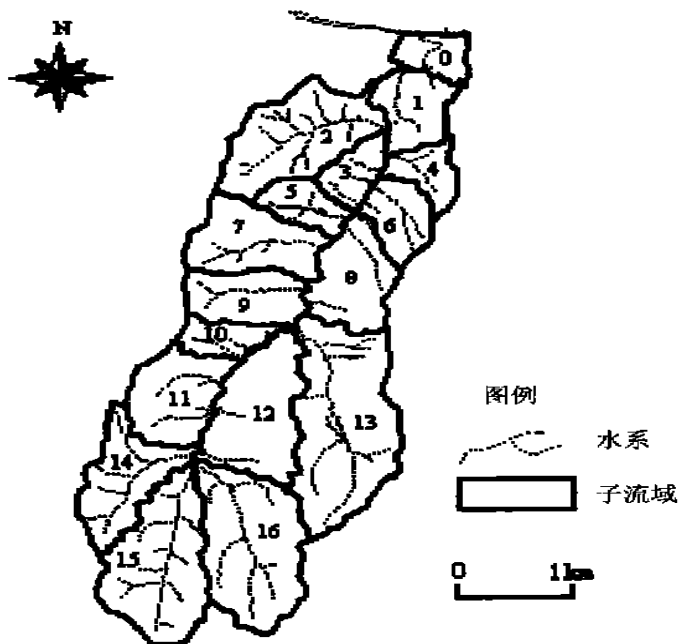


图 3 纸坊沟子流域划分图

Fig. 3 Sub-catchments of Zhifanggou watershed

由于纸坊沟流域面积仅为 8.27 km^2 , 划分后得到的子流域内的各个环境因子可以视为均质, 符合隶属度判别法关于标准区域、检验区域、待测区域的假设条件。随机选择编号为 S8 的子流域为待判区域, 其它 16 个子流域用作参考区域, 因此, 设计标准参照区域为除 S8 以外的其他区域, 分别对与标准参照区域同源的参照组中的每一个子流域以及子流域 S8 进行检验, 预测结果和水文实测数据、USLE 计算数据进行比较。

2.3 提取环境因子和表现因子特征值

2.3.1 环境因子

影响纸坊沟流域水土流失的环境因子包括侵蚀性降雨、土地利用、植被覆盖、地形地貌因子、土壤可蚀性、人类活动等。由于各子流域的侵蚀性降雨数据和植被覆盖数据缺乏, 而且小流域内降雨分布较为均一, 且评估的输沙模数是水土流失潜在强度的概念, 降雨因子可不予以考虑; 而植被覆盖因子可以由与其相关性较好的土地利用因子 (L) 代替。人类活动通过改变其它环境因子来实现, 也不列入考虑范围。由于研究区沟壑纵横, 在地形地貌因子选定坡沟因子 (L_{sg})、高差因子 (Δh) 两个因子, 最终选定的环境因子为四个, 即土地利用因子 (L)、坡沟因子 (L_{sg})、高差因子 (Δh)、土壤可蚀性因子 (S)。

(1) 土地利用因子 (L) 的量化

不同土地利用类型具有不同的水土保持效益, 利用层次分析法 (AHP) 可以得到各种土地利用类型对水土流失的抑制权重。本文采用文献 [9] 在纸坊沟研究中得到的权重表 (表 1)。

表 1 不同土地利用类型对水土流失的抑制权重

Tab. 1 Weight of each land use category resisting soil and water loss

土地利用类型	水田	旱田	果园	林地	草地	居民地	水体	荒地
抑制权重	0.094	0.039	0.149	0.224	0.094	0.039	0.322	0.039

对于每个子流域, 各土地利用类型的面积按照其土地利用类型的权重加权可以得到该子流域的土地利用特征指标 (表 2), 特征指标的值越大, 表示该子流域遭受侵蚀的可能性越小。

表 2 标准参照子流域环境因子和表现因子特征值及类别归属

Tab. 2 Eigenvalues of environmental factors and representative factor of reference sub-catchments and their classification

子流域		特 征 值				类 别 归 属				
D	L	L _{sg}	Δh (m)	S	E (t/km ² · a)	L	L _{sg}	Δh (m)	S	E (t/km ² · a)
S0	0.0988	0.07	130	1	108	2	1	1	1	1
S1	0.1215	1.38	397	2	1839	1	1	4	2	1
S2	0.0751	4.43	305	2	9485	2	2	2	2	2
S3	0.1155	6.43	401	2	9046	1	3	4	2	2
S4	0.1116	5.03	331	2	7277	2	2	2	2	2
S5	0.0991	4.96	237	2	8000	2	2	2	2	2
S6	0.1019	4.29	310	2	6786	2	2	2	2	2
S7	0.0782	5.86	392	2	12171	2	3	4	2	3
S9	0.0984	4.70	335	2	7717	2	2	3	2	2
S10	0.0613	7.30	419	2	19374	4	4	4	2	4
S11	0.0486	4.04	225	2	13262	4	2	2	2	3
S12	0.0601	2.05	145	2	5404	4	2	1	2	2
S13	0.1057	5.65	361	2	8657	2	2	3	2	2
S14	0.0550	7.20	298	2	21055	4	4	2	2	4
S15	0.0640	6.97	314	2	17540	3	4	2	2	4
S16	0.0751	8.68	256	2	18527	3	4	2	2	4

注: 表中计算得到的侵蚀模数数据以及由此建立的模型所预测的侵蚀模数数据建立在 1988 年降水水平的基础上。E 值与表中环境因子数据得到的值的差异是由环境因子的有效数字位数与计算使用位数的差异引起的。

(2) 沟坡因子 (L_{sg}) 的计算

沟坡因子 $L_{sg} = L_s \times T$, 其中 T 为沟坡比, 是计算单元内 (本文中计算单元是子流域) 沟蚀面积和坡面侵蚀面积的比值。 L_s 是 USLE 中的坡面参数, 本文采用江忠善等人对

黄土高原研究的经验公式^[15] $L_s = 1.07 (a/20)^{0.28} (b/10)^{1.45}$, 其中 a 代表以米为单位的坡长, b 为百分比坡度。经计算得到各个子流域的沟坡因子 (表 2), 值越大, 表示越容易遭受水土流失。

(3) 高差因子 (Δh) 的获取

通过 DEM 获得的高程数据与子流域图层叠加获得表 2。

(4) 土壤可蚀性因子 (S)

因纸房坊沟的土壤组成比较均一, 故该因子特征值提取没有采用已有的土壤可蚀性研究提供的经验值, 而是简单定义松散黄土覆盖地的可蚀性因子值为 2, 冲积土的可蚀性因子值为 1, 松散黄土的流失可能性略大于冲积土。各子流域的土壤可蚀性特征值见表 2。

2.3.2 表现因子

表现因子特征值采用输沙模数 (E), 反映潜在水土流失程度。然而, 对各子流域来说缺少第一手的观测资料, 所以需要通过有关数据进行技术处理找到近似的输沙模数。文献表明^[14]流域内 1988 年的输沙模数实测值为 $11501 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$, 而且流域侵蚀程度从轻度到剧烈侵蚀不等, 多数为强度侵蚀, 从上游到下游逐渐降低。

利用 USLE 的由环境因子特征值出发计算侵蚀模数以及使用多个环境因子值相乘建立方程的原理, 以土地利用因子和沟坡因子作为主要考虑因子, 高差因子作为次要考虑因子, 使用如下测算公式:

$$E_i = (L_{sg_i}/L_{sg_5}) * (L_s/L_i) * (1 + (\Delta h_i - \Delta h_5)/10000) * E_6$$

其中 E_i 为 i 区域的输沙模数, L_{sg_i} 为 i 区域的地形地貌因子特征值, L_i 为 i 区域的土地利用因子特征值, Δh_i 为 i 区域的高差因子特征值。

测算结果表明, 在假定 S_5 的输沙模数为 $8000 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ 前提下得到的输沙模数较为符合前面所述的 1988 年要求, 由此得到的数据近似确定为表现因子数据 (表 2)。

2.4 建立标准参照组

对于子流域 $S_0 \sim S_{16}$ (S_8 除外), 根据其表现因子数据 (表 2), 使用统计软件 SPSS 中的层次聚类法 (Hierarchical Cluster Analysis) 进行聚类 (设定聚类算法为欧式距离平方法), 得到聚类层次树状图 (图 4)。

图 4 中输沙模数大致可以分为 4 类, 再次使用 SPSS 对输沙模数进行聚类, 设定聚类类别为 4 类, 得到聚类结果, 也即水土流失标准参照组, 同样使用 K 均值逐步聚类分析 (K-Means Cluster) 可以得到各个类别的中心点, 以此作为各类别的输沙模数特征值 (表 3)。

表 3 水土流失标准参照组——表现因子聚类结果
Tab. 3 Clustering results of representative factor of reference groups

参照组	包含子流域	输沙模数特征值	侵蚀程度描述
G ₁	S0, S1	974	轻 度
G ₂	S2, S3, S4, S5, S6, S9, S12, S13	7797	强 度
G ₃	S7, S11	12717	极强度
G ₄	S10, S14, S15, S16	19124	剧 烈

2.5 判别模型的建立和检验

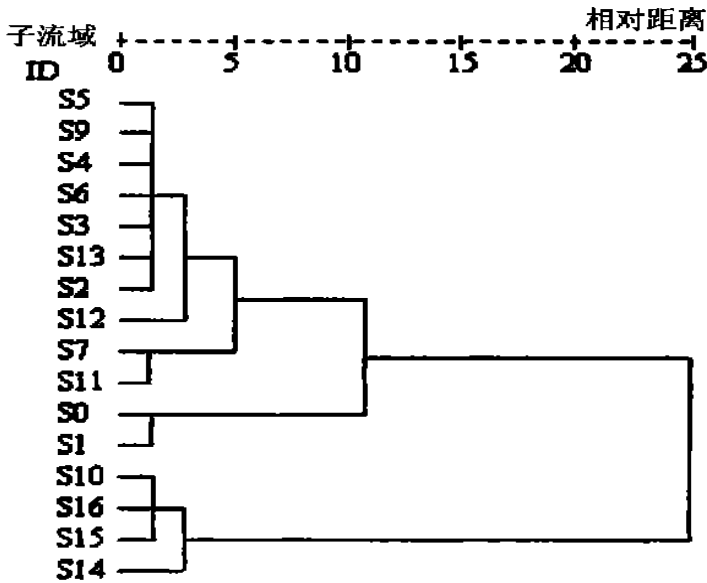


图 4 子流域输沙模数层次聚类图

Fig.4 Dendrogram of hierarchical cluster analysis for sub-catchments

2.5.1 判别模型的建立

(1) 计算环境因子权重行向量 δ

针对当地实际情况, 结合特尔菲法和经验判断, 可以得到 $\delta = (0.6, 0.3, 0.05, 0.05)$, 其中的权重值自左至右依次代表 L_{sg} 、 L 、 Δh 、 S 。

(2) 各环境因子的各个特征值对标准参照组的隶属度

对输沙侵蚀模数的各个相关因子, 根据其特征值的大小, 参照表现因子的聚类结果, 也将其划分为 4 类, 每一类包含的子流域数目同表 3 中的数目, 得到的结果见表 2。结合表 2 中的类别归属数据, 辅以 SPSS 软件的判别分析功能可以得到各环境因子的各个特征值对标准参照组的隶属度。

(3) 由 $\beta = \delta \cdot \eta$ 得到各参照区域对标准参照组的隶属度向量, 然后对隶属度向量作标准化处理, 得到标准化隶属度向量。

(4) 输沙模数 E_x 计算

$E_x = E_c \pm (\Delta F_x - \Delta F_c) * 15000$, 公式右端中间的符号对 G_1 取负号, 对其他参照组取正号。 ΔF_c 的值对 G_1 到 G_4 分别是 0.094, 0.096, -0.097, 0.200。

2.5.2 判别模型的检验

对 2.5.1 的判别模型进行检验。检验分为使用数据与标准参照组同源的各个参照区域的模型可靠性统计检验和使用独立于参照组的 S8 子流域以及整个纸坊沟流域的应用结果检验。

(1) 模型可靠性的统计检验

土壤流失等级预测方法的统计检验

对于参照组中的各个子流域, 判别公式 $\beta = \delta \cdot \eta$ 测算和标准化处理, 得到各个子流域的

参照组隶属度向量（表 4）。

表 4 模型检验——各子流域表现因子的参照组隶属度以及输沙模数预测结果
Tab. 4 Model test- membership of sub-catchments to the four groups and
the forecasting sediment transfer modules

子流域 D	G_1	G_2	G_3	G_4	隶属参照组	类别判别	模数预测值	误差	误差
						对错	($t/km^2 \cdot a$)	($t/km^2 \cdot a$)	(%)
S0	0.872	0.128	0.000	0.000	1	1	470	362	333.95
S1	0.939	0.061	0.000	0.000	1	1	1478	-361	-19.63
S2	0.000	0.786	0.213	0.000	2	1	9558	73	0.77
S3	0.126	0.554	0.320	0.000	2	1	9270	224	2.48
S4	0.106	0.740	0.154	0.000	2	1	7086	-190	-2.62
S5	0.028	0.838	0.133	0.000	2	1	7933	-67	-0.84
S6	0.038	0.890	0.072	0.000	2	1	6877	91	1.34
S7	0.000	0.106	0.814	0.080	3	1	13788	1616	13.28
S9	0.021	0.864	0.115	0.000	2	1	7764	47	0.61
S10	0.000	0.000	0.196	0.804	4	1	19180	-194	-1.00
S11	0.000	0.305	0.558	0.137	3	1	11646	-1616	-12.18
S12	0.291	0.543	0.166	0.000	2	1	4496	-909	-16.82
S13	0.062	0.688	0.250	0.000	2	1	9169	511	5.91
S14	0.000	0.000	0.190	0.810	4	1	19277	-1779	-8.45
S15	0.000	0.000	0.254	0.746	4	1	18316	775	4.42
S16	0.000	0.000	0.179	0.817	4	1	19432	905	4.89

注：表中列“类别判别对错”为布尔变量，1表示判别正确，0表示判别错误。

可以看到，类别判别的正确率为 100%，因此判别模型的水土流失等级预测方法通过检验。

输沙模数 E_x 预测方法的统计检验

根据 $E_x = E_c \pm (\Delta F_x - \Delta F_c) \cdot 15000$ 对各个参照区域进行预测，预测结果如表 4。

预测结果中除了子流域 S7、S11、S14 的误差在 $1000 t/km^2 \cdot a$ 以上之外，其它子流域均在 $1000 t/km^2 \cdot a$ 以下；而参考百分比误差，由于轻度侵蚀级别的子流域模数很小，所以百分比误差较大；强度侵蚀级别的 8 个子流域除 S12 误差率为 16.82% 以外，其他子流域均小于 6%；极强烈侵蚀的 2 个子流域输沙模数的误差率在 10% 左右；剧烈侵蚀的 4 个子流域误差率均小于 10%。考虑到输沙模数计算的复杂性，这样的预测结果还可以接受；另外，使用统计分析软件 SPSS 的两个独立样本检验和方差分析功能对实测值和预测值进行统计检验，结果表明，两个样本的均数、中位数、离散趋势、偏度、方差分布等均无明显差异，说明方法通过检验。

(2) 应用测试及检验

独立区域 S8 的预测和检验

S8 的环境因子如表 5:

表 5 待测区域 S8 的各个环境因子特征值

Tab. 5 The environmental factors of sub-catchment coded as S8

子流域 D	L	L _{sg}	Δh (m)	S
S8	0.083	3.32	399	2

按照判别模型给出的隶属度矩阵算法，得到 S8 对标准参照组的隶属度矩阵为:

$$\eta = \begin{pmatrix} 0.096 & 0.613 & 0.252 & 0.038 \\ 0.319 & 0.626 & 0.054 & 0.001 \\ 0.497 & 0.226 & 0.163 & 0.114 \\ 0.000 & 0.333 & 0.333 & 0.333 \end{pmatrix}$$

由判别公式 $\beta = \delta \cdot \eta$ 计算 S8 的输沙模数对标准参照组的隶属度，然后进行标准化，标准化后的隶属度向量为 $\beta = (0.123 \ 0.794 \ 0.083 \ 0.000)$ ，由此确定 S8 的输沙模数归属参照组 G_2 ，即水土流失属于强度侵蚀。

根据公式 $E_x = E_c \pm (\Delta F_x' - \Delta F_c') \cdot 15000$ 计算 S8 的输沙模数预测值: $5770 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ 。

使用经典的统计分析模型 U S L E，参考我国学者对黄土高原等地的研究实践^[14~17]得到的一些经验数值，测算出 1988 年 S8 的各个 U S L E 因子数值: $R = 144.6$, $K = 0.29$, $L_s = 9.162$, $C = 0.33$, $P = 0.45$ ，由此得到输沙模数为 $5705 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ ；可以看到，预测结果和 U S L E 结果接近，但在所用因子的确定上，本方法要比 U S L E 简练。

纸坊沟全流域的预测和检验

使用全流域的各个环境因子的特征值（加权平均值）来对全流域进行预测，得到的标准化隶属度向量为 $\beta = (0.000 \ 2.18 \ 0.724 \ 0.047)$ ，由此确定全流域的平均情况为强度侵蚀，侵蚀量为 $10650 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ 。使用 U S L E 预测结果为 $11308 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ ，水文法的实测值为 $11501 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ ，与 U S L E 的预测结果比较接近，与实测值相比，误差为-7.40%，预测结果比较理想。

3 总结与展望

本文引入隶属度判别分析对水土流失快速评估方法进行修正，并以纸坊沟小流域为例建立了具体的数理判别模型，从而使快速评估方法适用于输沙模数绝对量的估算。统计检验和类比检验表明模型本身以及应用结果可靠易行。本方法的应用并不局限于小流域，根据研究尺度和目的不同，选择合适的环境因子和单元划分，可进行不同尺度的水土流失强度和输沙模数快速评估。

本方法在实际应用中需要注意两个问题。一是方法本身蕴含的两个基本假设——标准参照区域的内部因子均质假设和相同的其它环境变量下输沙模数对某环境变量特征值近似成线性相关假设是简化模型实现快速评估的前提，这要求根据研究目标和区域特点采用合适的单元划分。二是输沙模数估算中没有考虑降水因子，因此所得到的侵蚀模数反映的是潜在水土流失程度或模型建立的降水条件下的水土流失量，如果要预测各种降水条件下实际发生的水土流失量，还须在模型中引入降水因子。

参考文献

- [1] 蔡强国, 刘纪根. 关于我国土壤侵蚀模型研究进展. 地理科学进展, 2003, 22(3): 242~ 250.
- [2] Wischmeier, W. H., Smith, D. D., Predicting rainfall erosion losses—a guide to conservation planning, USDA, Agricultural Research Service Handbook No. 537, 1978: 58. 537.
- [3] Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., Porter, J. P., RUSLE—revised universal soil loss equation. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 46(1): 30~ 33.
- [4] 胡良军, 李锐, 杨勤科等. 基于GIS的区域水土流失评价模型. 应用基础与工程科学学报, 2000, 8(1): 1~ 8.
- [5] 王协康, 方铎. 土壤侵蚀产沙量的人工神经网络模拟, 成都理工学院学报, 2000, 27(2): 197~ 201.
- [6] Knisel, W. G., CREAM S—a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems, USDA Research Report No. 26, No. 26, 1988 1985: 643.
- [7] Flanagan, D. C., Laflen, J. M., The USDA water erosion prediction project (WEPP). Eurasian Soil Science, 1997, 30(5): 524~ 530.
- [8] 杨勤科, 李锐. LISEM: 一个基于GIS的流域土壤流失预报模型. 水土保持通报, 1998, 18(3): 82~ 89.
- [9] FavisMortolock, D. T., A self-organizing dynamics systems approach to the simulation of rill initiation and development on hill-slopes. Computer & Geosciences, 1998, 24(4): 353~ 372.
- [10] 倪晋仁, 李英奎. 基于土地利用结构变化的水土流失动态评估. 地理学报, 2001, 56(5): 611~ 621.
- [11] 李钜章, 景可, 李凤新. 黄土高原多沙粗沙区侵蚀模型探讨. 地理科学进展, 1999, 18(1): 46~ 53.
- [12] 胡世雄. 坡面土壤侵蚀临界坡度问题的理论与实验研究. 地理学报, 1999, 54(4): 27~ 33.
- [13] 王晗生, 刘国彬. 植被结构及其防止土壤侵蚀作用分析. 干旱区资源与环境, 1999, 13(2): 62~ 68.
- [14] 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, 34~ 50.
- [15] 江忠善. 黄土高原土壤流失预报方程中降雨侵蚀力和地形地貌因子的研究. 西北水土保持研究所集刊, 1988, 7: 40~ 45.
- [16] 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.
- [17] 王万忠, 焦菊英. 黄土高原降雨侵蚀产沙与黄河输沙. 北京: 科学出版社, 1996: 102~ 132.

A Revised Fast Assessment Model for Soil Loss Based on Probabilities of Group Membership

JU Wenxue, LI Tianhong, NI Jinren

①Department of Environmental Engineering, Peking University;
Key Laboratory for Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, Beijing 100871)

Abstract: Abstract: Currently, a fast method for soil loss assessment that uses rapid water quality evaluation method as reference has been proposed. The core thought of the method is that areas with similar environmental factors should suffer similar soil loss. Compared with existing methods for soil loss assessment such as USLE, which needs too much factor calibration, the fast method can produce soil loss degrees in areas without enough data.

Some steps can be improved and concrete models should be constructed if it is used to estimate the soil loss module. In this paper, the fast assessment method for soil erosion is improved based on probabilities of group membership supported by Geographical Information System, which is introduced in this paper. The improved method can be implemented with 8 successive steps: 1) clustering standard referring regions using representative factor which can be indicated by soil erosion modulus, 2) constructing standard reference groups of soil erosion, 3) matching the environmental factors of reference regions to standard reference groups and calculating their probabilities of group membership, 4) getting the weight of each land use/cover category to soil loss by Analytical Hierarchical Process, getting the weights of topographical factors to soil loss by existing studies, and getting the weights of soil erodibility by experiences, 5) using standard referring groups, probabilities of group membership, and weights of environmental factors to construct fast assessment model, 6) testing the model in statistical theory, 7) analyzing and calibrating the environmental factors of unknown regions, and 8) predicting soil erosion modulus in unknown areas. A case application of the method was also carried out in Zhifanggou catchment, Yanhe watershed in North part of Shaanxi Province. The soil erosion map was produced and it revealed that the soil erosion degrees and their spatial distribution is in agreement with the actual situation. The USLE method was also used in estimating the soil erosion module for unknown areas. The module calculated by the proposed method is very similar to that obtained by USLE. However, the method carries some advantages in factor calibration and easy operation. Though the case study in this paper is for a small basin, the method does not limit itself to small basin level. If some appropriate environmental factors are selected and proper spatial units are adopted in dividing the target region, the method can be expanded to bigger basins for rapid quantitative assessment of soil loss.

Key words: probability of group membership; fast assessment; soil loss