

水蚀荒漠化的最大熵模糊优化评价模型^{*}

周晓蔚¹,王丽萍¹,李安强²,张验科¹

(1. 华北电力大学 能源与动力工程学院 水资源与水利水电工程研究所,北京 102206;2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室,武汉 430072)

摘 要:基于最大熵原理,应用模糊集合论中的隶属度等概念,综合考虑土地水蚀荒漠化评价的随机性和模糊性,定义加权广义距离表征待评价土地样本与标准样本的差异,建立最大熵模糊优化评价模型。通过实例,选择沟谷密度、坡度、土壤厚度、土壤有机质和植被指数等 5 项指标,给出土地样本的水蚀荒漠化最优分级;对比模糊综合评判,所建模型评价结果具有较小的 Shannon 熵,即分级决策具有较小的不确定性。

关键词:水蚀荒漠化;不确定性;模糊性;Shannon 熵;最大熵原理;评价方法

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1005-3409(2008)01-0145-03

Model of the Water-eroded Desertification Quality Fuzzy Assessment Based on Maximum Entropy

ZHOU Xiao-wei¹,WANG Li-ping¹,LI An-qiang²,ZHANG Yan-ke¹

(1. Research Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, University of Energy and Power Engineering, North China Power University, Beijing 102206, China;2. The State's Key Laboratory of Water Resource and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract :Based on the Principle of Maximum Entropy and the concept of relative membership degree in the theory of fuzzy set , through considering the complexity and uncertainty of land ecology system ,as well as defining the difference attributed by generalized weighted distances between soil samples and standard samples ,a Fuzzy Assessment model based on Maximum Entropy is promoted. A concrete example ,which studies on the five indices ,including cutting density ,slope ,soil thickness ,soil organic matter content ,and vegetation to show the optimum degree of water-eroded desertification was given in detail. Through comparison with the results of the model only considering fuzziness ,the results derived from the present models has smaller Shannon entropy ,namely the cascade decision making has less uncertainty.

Key words :water-eroded desertification ;uncertainty ;fuzziness ;shannon entropy ;maximum entropy principle ;evaluation method

全世界 67 % 的国家和地区,约 10 亿的人口,33 % 的陆地受到荒漠化的威胁。荒漠化正以每年 5 ~ 7 万 km² 的速度扩大。每年因荒漠化造成的直接经济损失高达 423 亿美元。中国是世界荒漠化面积最大、受害人口最多、危害程度最严重的国家之一。最新公布的荒漠化面积为 263. 62 万 km²,占陆地面积的 27. 46 % ,其中水蚀荒漠化面积为 65 万 km²,占荒漠化土地的 24. 65 %。

土地荒漠化是全球环境变化研究中的一个重要内容。荒漠化评价的目的是为了掌握一定区域荒漠化现状、成因和治理效果等,为预测荒漠化的发展、拟定防治措施提供科学的依据和决策支持。目前,评价方法多为定性、半定性、半定量。用数学模型方法对荒漠化程度进行定量描述是发展方向,这方面的研究正处于起步阶段,已有利用梯度分析、聚类分析、欧式距离法和模糊数学等方法评价荒漠化程度^[1]。但由于土地生态系统具有复杂性和不确定性,荒漠化评价中的荒漠化程度、类别、分类界限等都是一些客观存在的模糊概念与模糊现象,在变动的环境因素影响下,表征荒漠化的指标本身出现的大小具有随机性。因此,目前评价方法虽多,

但还没有形成通用的荒漠化评价数学模型。

综合考虑土地荒漠化程度评价中的模糊性和随机性,引入 Shannon 熵描述土地生态系统的确定性;基于 Jaynes 最大熵原理建立土地荒漠化程度模糊优化评价数学模型,并与模糊综合评判法(Fuzzy Comprehensive Evaluation Method 简称 FCEM)^[2]进行算例分析比较。计算结果表明,该模型具有更高的可行性、有效性和可靠性。

1 评价指标

水蚀荒漠化是以水力作用为主,伴随着其它因素的综合作用,导致土地生产力明显衰退,并出现荒漠或类似荒漠的景观。水蚀荒漠化主要特征^[3-5]是地表土壤物质大量流失,土层浅薄化,粗砂残存,增加了对红外线的吸收,致使气温升高,蒸发量增大,不能涵养水分;土壤有机质含量减少,养分贫瘠,土地生产潜力衰退,甚至土地资源丧失、废弃;塍面被蚕食,沟谷面积不断扩大,切割越来越破碎;植被逆向演替,结构单一,覆被减少或者出现裸地。因此,评价水蚀荒漠化程度主要从植被、土壤、地质地貌、气候和社会经济等方面进行考虑。该文参考文献[2]选择 5 个指标进行评价,见表 1。

^{*} 收稿日期:2006-11-08
作者简介:周晓蔚(1965 -),女,副教授,主要从事水资源保护研究。

表 1 水蚀荒漠化评价指标

指标等级	潜在 荒漠化	轻度 荒漠化	中度 荒漠化	强烈 荒漠化	严重 荒漠化
沟谷密度/ (km ² ·km ⁻²)	2	2~3	3~4	4~5	>5
坡度/(°)	<7	7~15	15~25	25~35	>35
土壤厚度/cm	>25	15~25	10~15	5~10	<5
土壤有机质/ (g·kg ⁻¹)	>33	25~33	15~25	5~15	<5
植被指数	>150	132~150	125~132	110~125	<110

沟谷密度是指单位面积沟谷侵蚀的长度,其值越大,反映地表被流水侵蚀破坏得越严重。坡度是一项间接指标,它能间接地影响土地荒漠化的变化过程及最终结果,如坡度越大,土地表层松散物质潜在的不稳性强,在流水作用下被侵蚀的可能性就大,增加了地表水土流失而使土层变薄的可能性。土壤层厚度和有机质与土地荒漠化有着极显著的关系。植被因子是评价土地荒漠化的关键因子。由于土地荒漠化是在人和自然因素的综合作用下,地表环境退化的总过程,其实质是土地肥力减弱或丧失生长绿色植物的能力。因此,植被盖度、生物量能很好地反映土地是否荒漠化和荒漠化的强弱程度;同时,从遥感图像上获取的植被指数与盖度、生物量具有很高的相关性^[6]。

2 评价模型^[7-9]

设有待分级评价的 n 个土地样本,每个样本有 m 项荒漠化指标实测值。根据水蚀荒漠化分级的模糊性,土地样本以不同的隶属度 u 分属于不同级别的荒漠化。构造隶属度模糊矩阵为

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{k1} & u_{k2} & \dots & u_{kn} \end{bmatrix} = [u_{hj}]_{kn} \quad (1)$$

s. t. $\sum_{h=1}^k u_{hj} = 1, u_{hj} > 0, (j = 1, 2, \dots, n; h = 1, 2, \dots, k)$

式中: u_{hj} ——第 j 个样本隶属于第 h 级荒漠化的隶属度。

显然,满足约束式的模糊分级矩阵有无穷多个。对荒漠化进行评价的目的,是确定出最优分级矩阵。但 $[u_{hj}]_{k \times m}$ 的确定具有不确定性,这样的不确定性可用 Shannon 信息熵:

$$H_j = - \sum_{h=1}^k u_{hj} \ln u_{hj} \quad (2)$$

$$C = \begin{bmatrix} \text{样 本} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ \text{沟谷密度} & 0 & 4 & 0 & 0 & 3.5 & 2.5 & 3.5 & 4.3 & 4.0 \\ \text{坡 度} & 5 & 12 & 0 & 3 & 15 & 23 & 15 & 0 & 20 \\ \text{有机质} & 60 & 15 & 10 & 15 & 35 & 10 & 30 & 20 & 20 \\ \text{土壤厚度} & 0.6 & 0.3 & 0.66 & 0.55 & 0.45 & 0.7 & 0.7 & 0.4 & 0.41 \\ \text{植被指数} & 140 & 131 & 134 & 135 & 135 & 139 & 140 & 122 & 131 \end{bmatrix} \quad (7)$$

用最大熵模糊优化评价模型公式(6),得 9 个样本的土地对第 1、2、3、4、5 级土地的最优分级隶属度矩阵:

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 0.2810 & 0.0037 & 0.0311 & 0.0554 & 0.0605 & 0.0162 & 0.1091 & 0.0044 & 0.0040 \\ 0.6714 & 0.0795 & 0.2507 & 0.4466 & 0.3880 & 0.3504 & 0.6996 & 0.0547 & 0.0875 \\ 0.0436 & 0.8028 & 0.6183 & 0.4557 & 0.5046 & 0.5128 & 0.1750 & 0.3674 & 0.7955 \\ 0.0035 & 0.0994 & 0.0871 & 0.0369 & 0.0409 & 0.1052 & 0.0142 & 0.5003 & 0.0985 \\ 0.0005 & 0.0146 & 0.0128 & 0.0054 & 0.0060 & 0.0154 & 0.0021 & 0.0732 & 0.0144 \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} \text{级} \\ \text{级} \\ \text{级} \\ \text{级} \\ \text{级} \end{matrix} \quad (8)$$

第 j 个样本与第 h 级荒漠化的差异则可用加权广义距离表示

$$d[e_h, f_j] = u_{hj} \left[\sum_{i=1}^m (w_i |e_{ih} - f_{ij}|) \right] (i = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

式中: $w = [w_1, w_2, \dots, w_m]$ ——指标权重向量; f_j ——第 j 个土地样本,即 $f_j = [f_{1j}, f_{2j}, \dots, f_{mj}]^T$; e_h ——第 h 级荒漠化标准,即 $e_h = [e_{1h}, e_{2h}, \dots, e_{mh}]^T$ 。

为获得最优分级矩阵,可通过一方面使全体样本与各级荒漠化的标准值之间的加权广义距离之和最小,即极小化;另一方面使由于随机性和模糊性所造成的不确定性最小,根据 Jaynes 最大熵原理,应使 Shannon 熵极大化。

求最优分级问题是一个目标优化问题,为解决此问题,构造如下复合目标优化问题

$$\min_{u_{hj}} \left\{ \sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^k u_{hj} \left[\sum_{i=1}^m (w_i |e_{ih} - f_{ij}|) \right] + \frac{1}{B} \sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^k u_{hj} \ln u_{hj} \right\} \quad (4)$$

s. t. $\sum_{h=1}^k u_{hj} = 1, u_{hj} > 0, (j = 1, 2, \dots, n; h = 1, 2, \dots, k)$

其中正参数 B 用来对 2 个目标进行平衡,根据实际问题设定。

构造问题的拉格朗日函数

$$L(u_{hj}, \lambda) = \sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^k \left\{ u_{hj} \left[\sum_{i=1}^m (w_i |e_{ih} - f_{ij}|) \right] + \frac{1}{B} u_{hj} \ln u_{hj} \right\} + \lambda \left[\sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^k u_{hj} - 1 \right] \quad (5)$$

式中: $L(u_{hj}, \lambda)$ ——拉格朗日函数。求解拉格朗日函数得到土地样本 j 对 h 级水蚀荒漠化标准的最大熵模糊优化评价模型为 (Fuzzy Assessment Based on Maximum Entropy 简称 FAME)

$$u_{hj} = \frac{\exp \left[-B \sum_{i=1}^m (w_i |e_{ih} - f_{ij}|) \right]}{\sum_{h=1}^k \exp \left[-B \sum_{i=1}^m (w_i |e_{ih} - f_{ij}|) \right]} \quad (6)$$

3 算例分析

以某地区土地水蚀荒漠化为例进行评价分析,以验证最大熵模糊优化评价模型(FAME)的合理性。其中该地区的一组实测数据如下:

用模糊综合评判 (FCEM) 方法的计算结果是:

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 0.3550 & 0.0000 & 0.2199 & 0.2199 & 0.1549 & 0.0000 & 0.1549 & 0.0990 & 0.0000 \\ 0.4343 & 0.1396 & 0.1983 & 0.2859 & 0.3135 & 0.4511 & 0.4937 & 0.1549 & 0.2450 \\ 0.0360 & 0.3253 & 0.3556 & 0.3195 & 0.3570 & 0.3029 & 0.1768 & 0.2684 & 0.5804 \\ 0.1397 & 0.4653 & 0.2053 & 0.1281 & 0.1048 & 0.2344 & 0.1630 & 0.3963 & 0.0955 \\ 0.0349 & 0.0699 & 0.0210 & 0.0466 & 0.0699 & 0.0115 & 0.0116 & 0.0815 & 0.0792 \end{bmatrix}$$

级

级

级

级

级

(9)

式 (8) 和 (9) 的计算结果表明,2 种方法评价结果基本一致。1,7 号样地属于 级,3,4,5,9 号样地属于 级,8 号样地属 级。2 号样地按 FAME 计算属于 级(隶属度为 0.802 8),按 FCEM 计算属于 级(隶属度为 0.465 3);6 号样地按 FAME 属于 级(隶属度为 0.512 8),按 FCEM 属于 级(隶属度为 0.451 1),从隶属度角度看,最大熵模糊评价优化模型 (FAME) 的分级间隶属度相差较大,结果更有效和更精确些。

由式 (8) 的结果可以预测土地荒漠化的发展趋势。如 1

号样地,根据最大隶属度原则,该样地属于轻度荒漠化,对这类土地稍加治理,荒漠化程度很容易得到控制。又如 8 号样地属于强度荒漠化,对这类土地需要加强治理,方能控制到中度荒漠化。提醒人们在荒漠化预防和治理过程中,应及时采取科学而可行的措施,使生态系统朝着对环境、对人类有利的方向发展。

依据式 (2) 可以给出决策的可靠性,2 种方法所对应的熵值见表 2。表中数据表明最大熵模糊评价模型 (FAME) 有较小的不确定性,即熵越小,其可靠性越高。

表 2 模型 FAME 和 FCEM 的熵值 (H_j) 比较

熵 值	1	2	3	4	5	6	7	8	9
H_j (FAME)	0.7843	0.6895	1.0201	1.0284	1.0436	1.0779	0.8701	1.0885	0.7066
H_j (FCEM)	1.2416	1.1822	1.4277	1.4617	1.4426	1.1123	1.2911	1.4417	1.0854

4 结 论

针对土地生态系统的复杂性和不确定性,考虑土地荒漠化评价中客观存在的模糊性和随机性,建立最大熵模糊优化评价模型。通过实例,选择沟谷密度、坡度、土壤厚度、土壤有机质和植被指数等 5 指标,评价了水蚀荒漠化程度,进一步证明了模型的可行性、有效性和可靠性,为荒漠化土地的预防和治理提供科学依据和决策支持。该模型既可用于水蚀荒漠化评价,也可用于其他类型的荒漠化评价。

参考文献:

[1] 那波,贾树海,刘扬. 关于荒漠化评价几个问题的探讨[J]. 中国农学通报,2006,22(1):305-310.

[2] 范建容,刘淑珍,钟祥浩,等. 金沙江热河谷土地荒漠化评价方法研究[J]. 地理科学,2002,22(2):243-247.

[3] 张启昌,赵雨森,周道玮. 松辽流域山地丘陵地区水蚀规律[J]. 东北林业大学学报,2006,34(2):55-57.

[4] 周忠学,孙虎,李智佩. 黄土高原水蚀荒漠化发生特点及其防治模式[J]. 干旱区研究,2005,22(1):29-34.

[5] 陈志清. 福建省长汀县河田镇的水蚀荒漠化及其治理[J]. 地理科学进展,1998,17(2):66-70.

[6] 刘淑珍,范建容,刘刚才. 金沙江干热河谷土地荒漠化评价指标体系研究[J]. 中国沙漠,2002,22(1):47-51.

[7] 张成科. 基于熵的水质模糊评价模型及应用[J]. 系统工程理论与实践,1998(6):80-85.

[8] 吴乃龙,袁素云. 最大熵方法[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,1991:6-10.

[9] Jaynes E T. Information Theory and Statistical Mechanics[J]. Phy. Rew.,1957,106:620-630.

(上接第 144 页)

参考文献:

[1] 冯春涛. 构建土地利用规划环境影响评价的指标体系[J]. 资源开发与市场,2004,20(6):416-420.

[2] 史宝忠. 建设项目环境影响评价[M]. 北京:中国科学出版社,1999.

[3] 刘明亮. 土地利用规划的环境影响评价研究[M]. 长沙:湖南师范大学,2004.

[4] 卢娇丽,郑家恒. 基于成对比较的关键词权重计算与主题词抽取[J]. 山西大学学报:自然科学版,2005,28(1):29-32.

[5] 徐福留,卢小燕,周家贵,等. 大型水利工程环境影响评价指标体系及模糊综合评价:以巢湖“两河两站”工程为例[J]. 水土保持通报,2001,21(4):10-14.

[6] 唐启义,冯明光. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统[M]. 北京:科学出版社,2002.