

一种基于粗糙集和灰色理论的 绿洲生态稳定性评价方法*

王耀斌^{1,2}, 冯起¹, 司建华¹, 常宗强¹

(1. 中国科学院寒区与旱区环境工程研究所, 兰州 730000; 2. 西北师范大学实验室与设备管理处, 兰州 730000)

提 要: 针对当前绿洲稳定性评价方法的不足, 提出了一种简单易行、便于推广的基于粗糙集和灰色理论的绿洲稳定性评价方法。尝试用新的方法, 从绿洲稳定性的不同方面, 来评价绿洲的稳定性。并以宁夏绿洲为例, 与专家结论对照, 验证分析了该方法的可行性及实用性。

关键词: 粗糙集; 灰色理论; 绿洲生态稳定性

中图分类号: X37

文献标识码: A

绿洲是干旱区的脆弱系统, 争取绿洲系统可持续发展是干旱区人类生存和发展所追求的基础目标。如何充分而合理地利用绿洲资源, 用科学的方法对绿洲加以利用、改造与管理, 就成为一个亟待解决的问题。绿洲的衰退、萎缩或消亡有多种因素, 但不外乎自然因素的急剧发作, 社会人文因素的剧烈变异, 或自然与人文因素的迭加共振^[1]。国外绿洲研究成果不多, 主要集中在生物资源调查、水资源利用对绿洲的影响、环境变化、经济开发等方面^[2-5]。我国对绿洲的研究走在世界的前列, 近代绿洲研究始于陈正祥、周立三^[6]。随着黄盛璋建立绿洲学^[7], 绿洲研究全面展开。许多专家及学者相继对绿洲研究做出了很大贡献, 并取得了一定的成果。但是对绿洲稳定性评价方法的研究由于评价目的、评价区域以及环境条件等的差异, 评价方法主要有以下几种: 层次分析法^[8-11]、灰色计量模型^[12-13]、景观生态学方法^[14-15]、主成分分析法^[16-17]、综合模式评价法^[18]等, 同时还有利用“3S”技术对绿洲可持续发展的评价^[19-22]。这些评价方法或多或少都受到主观偏好的影响, 导致指标的权重分配不尽合理, 难以进行客观公正的评判, 甚至有的方法设计复杂, 难以推广。针对存在的问题, 文中采用粗糙集和灰色关联理论客观确定权重, 使权重分配更加合理、公正, 而后使用模糊数学构建评价模型, 定量评价绿洲生态稳定性, 旨在为绿洲的研究提供新的技术与方法。文中通过抽取裴源生等在文献^[23]中提供的的数据资料, 进行实证计算分析, 并与其结论比较, 验证了用该方法评价预测绿洲稳定性完全可行, 该方法同时具有简单易行、便于推广的特点。

1 研究方法

研究将信息量的概念引入到粗糙集的信息系统中, 通过知识的信息量对属性的重要性进行定义, 利用粗糙集理论确定指标的客观权重, 将所得的客观权重与灰色理论计算权重相结合, 得出指标的综合权重, 而后构建评价模型, 对绿洲的稳定性做出评价。

1.1 基于粗糙集理论的权重确定

1.1.1 粗糙集相关定义

粗糙集(Rough Set)理论^[24]是波兰数学家 Z Pawlak 在 1982 年提出的一种分析数据的数学理论, 该理论在分类的意义下定义了模糊性和不确定性的概念, 是一种处理不确定和不精确问题的新型数学工具。下面给出与研究中有关系的定义:

* 收稿日期: 2009-7-8。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40725001, 40671010, 40501012); 中国科学院西部行动计划(二期)项目(KZCX2-XB2-04-02)

资助
(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net
作者简介: 王耀斌(1976-)男, 甘肃会宁人, 实验师, 博士, 主要从事干旱区水文水资源研究。联系邮箱: yaobinwang2006@163.com

定义 1: 不可分辨关系 设 $U \neq \emptyset$ 是研究对象组成的有限集合 称论域 任何子集 $X \subseteq U$ 称为 U 中的一个概念或范畴 设 R 是 U 上的一个等价关系 U/R 表示 R 的所有等价类(或者 U 上的分类)构成的集合, $(X)_R$ 表示包含元素 $x \in U$ 的 R 等价类。一个知识库就是一个关系系统 $K = (U, R)$ 其中 U 为论域 R 是 U 上的一族等价关系。

定义 2: 上、下近似 可以用上、下两个近似来近似定义粗糙集。给定知识库 $K = (U, R)$ 对于每个子集 $X \subseteq U$ 和一个等价关系 $R \in \text{ind}(K)$ 定义两个子集:

$$R_-X = U\{Y \in U/R | Y \subseteq X\} \quad (1) \quad R^+X = U\{Y \in U/R | Y \cap X \neq \emptyset\} \quad (2)$$

分别称它们为 X 的 R 下近似集和 R 上近似集。其中 $\text{pos}_R(X) = R_-X$ 称为 X 的 R 正域; $\text{neg}_R(X) = U - U^+R$ 称为 X 的 R 负域。

定义 3: 知识依赖度 对于近似空间 $K = (U, R)$ 且 $P, Q \subseteq R$; 当 $\text{ind}(P) \subseteq \text{ind}(Q)$ 知识 Q 依赖于知识 P , 知识 Q 对 P 的依赖度定义如下:

$$k = \text{rp}(Q) = \text{Card}(\text{pos}_P(Q)) / \text{Card}(U) \quad (3)$$

其中 Card 表示集合的基数 k 的取值在 $(0, 1)$ 的区间内 k 值越大则对指标的依赖度越小。

1.1.2 粗糙集理论客观定权

研究对象 $U = \{X, U_i, e, f\}$ 中, 评价指标 $U_i, i = 1, 2, 3, \dots$ 作为条件属性包含于每个 X 子集中, 由于 U_i 对于决策属性 e 取值影响的程度不同, 故赋予它们不同的权重, 利用粗糙集中属性的重要程度定义客观权重

$$\text{为: } P_i = \text{pos}_{u_i}(U_i) / \sum_{i=1}^n \text{pos}_{u_i}(U_i) \quad (4)$$

其中 $\text{pos}_{u_i}(U_i)$ 代表第 i 个指标对评价绿洲生态稳定性的重要度, 其计算式如下:

$$\text{pos}_{u_i} = r_c(D) - r_{c-i}(D) \quad (5)$$

其中 $r_c(D)$ 表示整个子集对论域的依赖度, 而 $r_{c-i}(D)$ 表示去掉第 i 个指标后所得子集对论域的依赖值。在绿洲生态稳定性评价中, 由于事先不知道评价结果, 所以研究用下式计算:

$$\text{pos}_{u_i} = r_c(D) - r_{c-i}(D) = 1 - r_{c-i}(D) \quad (6)$$

1.2 灰色关联理论确定权重

灰色理论中的关联度分析^[25]是对一个发展变化系统的状态和趋势的定量化比较, 同回归分析相比, 它对样本多少和类型无特殊要求, 且计算量小, 量化结果可靠。运用灰色关联分析法的具体步骤如下:

(1) 对数据做均值化处理, 使其无量纲化:

$$X_i^*(k) = X_i(k) / \frac{1}{n} \sum_{k=0}^n X_i(k) \quad (i = 1, 2, \dots, m; k = 0, 1, \dots, n) \quad (7)$$

$$(2) \text{ 求参考序列与比较序列的绝对差: } \Delta_i(k) = |X_i^*(k) - X_i^*(0)| \quad (8)$$

$$(3) \text{ 计算两极最大差与最小差: } \Delta_{\max} = \max_i \max_k \Delta_i(k) \quad (9)$$

其中 $\Delta_{\min} = \min_i \min_k \Delta_i(k)$

$$(4) \text{ 计算关联系数: } r_i(j) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_i(k) + \xi \Delta_{\max}} \quad (10)$$

其中 ξ 为分辨系数, 它的取值只影响关联系数的大小, 不影响关联序, 一般取 0.5。

(5) 求得关联度:

$$R(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m r_i(k) \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

通过灰色关联分析, 得出各影响因子的关联度, 可根据关联度来确定它们的关联序。以排序结果为依据, 归一化处理得出各评价因子的权重值 β 。

1.3 综合权重的确定

$P_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为第 i 个指标在粗糙集理论下的客观权重, $\beta_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为第 i 个指标在灰色关联度理论下的客观权重, 定义第 i 个指标的综合权重值 W_i 为(其中 η 为调整参数):

$$W_i = \eta \beta_i + (1 - \eta) P_i \quad (12)$$

1.4 综合评价模型

应用模糊数学理论, 构建综合评价模型^[26]:

(1) 确定评价对象的因素论域 $U = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_n\}$, 即 n 个评价指标的集合。

(2) 确定评语等级论域 $V = \{V_1, V_2, V_3, \dots, V_n\}$, 即评价指标等级集合。

(3) 基于粗糙集和灰色理论的各评价指标综合权重 W_i 确定。

(4) 进行单因素评价,建立模糊矩阵 F 。 $F = (f_{ij})_{m \times n}$ ($0 \leq f_{ij} \leq 1$) ,矩阵中第 i 行第 j 列元素表示某被评区域从评价指标 U_i 来看对 V_j 等级模糊子集的隶属度。

(5) 计算各评价区域的模糊综合评价结果向量 B , $B = W \cdot F = (b_1, b_2, \dots, b_n)$,其中 b_j 反映被评区域从整体上看对 V_j 等级模糊子集的隶属程度。最后根据隶属度最大性原则确定评价等级。

2 实例验证

2.1 指标体系的选取及等级划分

根据研究目的,抽取了裴源生等在文献^[23]中提供的,银川市、平罗县、石嘴山市、贺兰县、青铜峡市、灵武市、永宁县、吴忠市、中宁县和中卫市 10 个市或县 2010 水平年 50% 黄河来水频率下的数据进行相应研究(表 1); 依据科学性、整体性、可操作性、层次性以及前瞻性的构建原则,选取裴源生等提供的 16 个具体指标及等级划分来定量分析宁夏绿洲的生态稳定性,建立由总体层、子系统层、指标层构成的结构框架(表 2)。

表 1 2010 水平年 50% 黄河来水频率下评价指标原始值

Tab. 1 Value of evaluation factors in the level of 2010 when inflow of the Yellow River is at probability of 50%

序列	地名	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{14}	c_{15}	c_{16}
1	中卫市	9488	3312	0	0.06	0.33	0.11	0.42	0.04	0.26	0.11	0.28	0.01	0.56	10421	3.23	3.23
2	中宁县	8670	4602	0	0.11	0.4	0.06	0.21	0.03	0.24	0.21	0.3	0.01	0.56	6309	2.66	2.66
3	青铜峡市	8500	3321	0.01	0.07	0.42	0.06	0.22	0.02	0.22	0.22	0.28	0.01	0.55	6175	2.38	2.38
4	永宁县	8345	3393	0.01	0.07	0.49	0.07	0.32	0.02	0.2	0.07	0.31	0.03	0.6	6798	2.32	2.32
5	银川市	7715	3871	0.01	0.05	0.53	0.1	0.18	0.03	0.25	0.09	0.3	0.04	0.67	7892	2.1	2.1
6	贺兰县	8400	4420	0.01	0.07	0.61	0.13	0.18	0	0.26	0.06	0.33	0.08	0.68	5311	1.91	1.91
7	平罗县	7757	3646	0.01	0.09	0.49	0.13	0.19	0.03	0.22	0.16	0.32	0.03	0.57	9806	1.71	1.71
8	石嘴山市	7571	2571	0.01	0.05	0.42	0.14	0.29	0.02	0.25	0.12	0.32	0.03	0.62	5373	2.11	2.11
9	吴忠市	9140	2590	0	0.06	0.42	0.16	0.28	0.04	0.25	0.12	0.28	0.01	0.6	8949	2.93	2.93
10	灵武市	9333	3926	0	0.07	0.49	0.14	0.21	0.03	0.29	0.15	0.28	0.01	0.58	11972	2.55	2.55

注: c_1, c_2, \dots, c_{16} 指代的意义及各数据单位见参考文献^[23]

表 2 绿洲生态稳定性评价指标体系及各指标等级划分

Tab. 2 The frame of oasis stability indicator system of Ningxia and grades of these evaluation factors

总体层	子系统层	指标层	代码	等级划分				
				优	良	一般	差	极差
绿洲生态稳定性	水资源	农田单位面积水资源量(+)	c_1	>7800	6600-7800	5400-6600	4200-5400	<4200
		非农田单位面积水资源量(+)	c_2	>3750	3000-3750	1950-3000	1050-1950	<1050
		农业缺水率(-)	c_3	<0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	>0.4
		生态缺水率(-)	c_4	<0.05	0.05-0.1	0.1-0.15	0.15-0.2	>0.2
	土地资源	耕地指数(-)	c_5	<0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	>0.8
		耕地盐渍化指数(-)	c_6	<0.05	0.05-0.2	0.2-0.35	0.35-0.5	>0.5
		荒地指数(-)	c_7	<0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	>0.5
	生物资源	林地指数(+)	c_8	>0.1	0.06-0.1	0.04-0.06	0.02-0.04	<0.02
		林地覆盖度(+)	c_9	>0.3	0.2-0.3	0.1-0.2	0.05-0.1	<0.05
		草地指数(+)	c_{10}	>0.3	0.2-0.3	0.1-0.2	0.05-0.1	<0.05
		草地覆盖度(+)	c_{11}	>0.8	0.5-0.8	0.2-0.5	0.05-0.2	<0.05
		湿地指数(+)	c_{12}	>0.1	0.05-0.1	0.03-0.05	0.01-0.03	<0.01
		基于生态绿当量的草地覆盖率(+)	c_{13}	>0.8	0.5-0.8	0.2-0.5	0.05-0.2	<0.05
环境因子	水污染状况(-)	c_{14}	<4000	4000-6000	6000-8000	8000-10000	>10000	
	地下水埋深(对盐渍化区的影响+)	c_{15}	>2.5	2.0-2.5	1.5-2.0	1.0-1.5	<1	
	地下水埋深(对非盐渍化区的影响-)	c_{16}	<1	1.0-2.0	2.0-4.0	4.0-5.0	>5	

注: 各指标详细注释见参考文献^[23]

2.2 权重的确定

2.2.1 粗糙集理论下的权重确定

根据绿洲稳定性评价指标的等级划分(表 2),用 1、2、3、4、5 五个等级对应表示极差、差、一般、良和

优 构造研究区域各指标对应的知识表达系统(知识库):如表 3 表 4 表 5 和表 6。

由表 3 可以看出: C 的 C_{c_1} 正域 $pos_{C_{c_1}}(C) = \{\{2\}\}$ 其依赖度 $k = Card(pos_{C_{c_1}}(C)) / Card(U) = 1/10 = 0.1$,所以指标 c_1 的重要度为 $1 - 0.1 = 0.9$,同理可得 c_2, c_3, c_4 的重要度依次为 $0.9, 0.5, 0.6$ 。由式 (4) 可得: $P_1 = 0.3103, P_2 = 0.3103, P_3 = 0.1724, P_4 = 0.2069$; 同理从表 4 得到 $P_5 = 0.3810, P_6 = 0.2381, P_7 = 0.3810$; 从表 5 得到 $P_8 = 0.2917, P_9 = 0.125, P_{10} = 0.1667, P_{11} = 0.125, P_{12} = 0.1667, P_{13} = 0.125$; 从表 6 得到 $P_{14} = 0.4762, P_{15} = 0.2857, P_{16} = 0.2381$ 。

表 3 知识表达系统
Tab.3 Knowledge expression system of Ningxia oasis

对象	c_1	c_2	c_3	c_4
1	5	4	5	4
2	5	5	5	3
3	5	4	5	4
4	5	4	5	4
5	4	5	5	4
6	5	5	5	4
7	4	4	5	4
8	4	3	5	4
9	5	3	5	4
10	5	5	5	4

表 4 知识表达系统
Tab.4 Knowledge expression system of Ningxia oasis

对象	c_5	c_6	c_7
1	5	4	2
2	5	4	4
3	5	4	4
4	5	4	3
5	4	4	5
6	3	4	5
7	5	4	5
8	5	4	4
9	5	4	4
10	5	4	4

表 5 知识表达系统
Tab.5 Knowledge expression system of Ningxia oasis

对象	c_8	c_9	c_{10}	c_{11}	c_{12}	c_{13}
1	2	4	3	3	1	4
2	2	4	4	3	1	4
3	1	4	4	3	1	4
4	1	3	2	3	2	4
5	2	4	2	3	3	4
6	1	4	2	3	4	4
7	2	4	3	3	2	4
8	1	4	3	3	2	4
9	2	4	3	3	1	4
10	2	4	3	3	1	4

表 6 知识表达系统
Tab.6 Knowledge expression system of Ningxia oasis

对象	c_{14}	c_{15}	c_{16}
1	1	5	3
2	3	5	3
3	3	4	3
4	3	4	3
5	3	4	3
6	4	3	4
7	2	3	4
8	4	4	3
9	2	5	3
10	1	5	3

注:论域由标号为 1,2...10 的研究区域组成,条件属性集 $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$ 表示与水资源相关的指标集。

注:论域组成同表 3,条件属性集 $C = \{c_5, c_6, c_7\}$ 表示与土地资源相关的指标集。

注:论域组成同表 3,条件属性集 $C = \{c_8, c_9, c_{10}, c_{11}, c_{12}, c_{13}\}$ 表示与生物资源相关的指标集。

注:论域组成同表 3,条件属性集 $C = \{c_{14}, c_{15}, c_{16}\}$ 表示与环境因子相关的指标集。

对 P_i 进行归一化处理得到:

$$P = (0.0776, 0.0776, 0.0431, 0.0517, 0.0953, 0.0595, 0.0953, 0.0729, 0.0313, 0.0417, 0.0313, 0.0417, 0.0313, 0.1191, 0.0714, 0.0595)。$$

2.2.2 灰色关联理论的权重确定

选取各评价指标等级划分中的最优临界值作为参考向量,依据式(7)~(11),取关联系数为 0.5,计算得到各指标的关联度经归一化处理得到对应权重 β :

$$\beta = (0.0740, 0.0727, 0.0264, 0.0702, 0.0728, 0.0655, 0.0712, 0.0460, 0.0713, 0.0572, 0.0535, 0.0465, 0.0693, 0.0663, 0.0726, 0.0646)。$$

2.2.3 综合权重

取调整参数 η 为 0.5,依据式(12)得到综合权重 W 为:

$$W = (0.0758, 0.0752, 0.0348, 0.061, 0.0841, 0.0626, 0.0833, 0.0595, 0.0514, 0.0495, 0.0425, 0.0442, 0.0504, 0.0928, 0.072, 0.0621)。$$

2.3 绿洲稳定性评价

2.3.1 隶属函数构造及其综合评价

根据指标等级划分,采用五值逻辑分区构造隶属函数(表 7),其中 I 区为极差,II 区为差,III 区为一般,IV 区为良,V 区为优,隶属函数值可直接根据指标等级(表 2)划分而定。

以中卫市为例,先由表 7 计算出隶属函数,再计算 $B = W \cdot F$,从而得到该区域的综合评价结果:

$$B = W \cdot F = \begin{bmatrix} 0.0758 \\ 0.0752 \\ \vdots \\ 0.072 \\ 0.0621 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.4110 & 0.5890 \\ 0 & 0 & 0.084 & 0.916 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0.3870 & 0.6130 \\ 0 & 0.115 & 0.885 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (0.0704, 0.1916, 0.1934, 0.3362, 0.2097)$$

取 β 向量中的最大值 0.3362,对应于第 IV 区间,故中卫市的绿洲稳定性属于良。同理得到其他区域的综合评价结果(表 8)。

2.3.2 结果分析

从表 8 明显看出:在 2010 水平年 50% 黄河来水频率下,用该方法评价的宁夏地区中卫市、银川市、平

罗县等十个区域绿洲稳定性全处于第IV区间,都属良好,评价结果与文献^[23]提供的结论完全一致,说明文中提出的该方法评价绿洲稳定性完全可行。

表7 隶属函数F的确定
Tab.7 The determination of membership function

Table with 6 columns: 区间, I, II, III, IV, V. It contains piecewise linear functions for membership grades across different intervals of x.

表8 绿洲稳定性评价区间及评价结果
Tab.8 Grade interval of oasis stability and evaluation results

Table with 9 columns: 序列, 地名, I, II, III, IV, V, 本方法评价结果, 文献[23]评价结果. Lists 10 locations and their stability grades and evaluation results.

3 结论

将粗糙集理论与灰色关联分析评价相结合,运用粗糙集理论得出指标的相对重要度,利用灰色关联分析法不需要大统计样本数据,对指标数据没有太苛刻要求的优点综合确定权重,提高了评价指标权重值的科学性、客观性和综合性,而后依据模糊数学理论,构建评价模型,将该方法应用于宁夏绿洲生态稳定性的评价预测,评价结果与专家的结论完全一致,表明该方法可以应用于绿洲稳定性的评价。

尝试用不同的评价方法,从绿洲稳定性的不同方面,综合判定绿洲稳定性的研究对促进绿洲学的发展具有重要的意义,同时也为绿洲稳定性评价提供了一种新的思路和方法。

参考文献

[1] 毋兆鹏. 中国绿洲稳定性研究的审视 [J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(10): 42-47.
[2] Pankov E I, Kuzmina ZV, Treshkin S E. The water availability effect on the soil and vegetation cover of Southern Gobioases [J]. Water Resource, 1994, 21(3): 358-364.
[3] Misak R F, Abdel Baki A A, EL_Hakim M S. On the causes and control of the waterlogging phenomenon, Siwa Oasis, northern Western Desert, Egypt [J]. Journal of Arid Environments, 1997, 37(1): 23-32.
[4] De Pauw E, Goble W, Adam H. Agrometeorological aspects of agriculture and forestry in the arid zones [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 103: 43-58.
[5] Sepaskhah A R, Kaoni A, Ghasemi M M. Estimating water table contributions to corn and sorghum water use [J]. Agricultural Water Manage-

- ment, 2003, 58: 67-79.
- [6] 周立三. 哈密 - 一个典型的沙漠沃洲 [A]. 周立三论文选集 [C]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990: 21-29.
- [7] 黄盛璋. 论绿洲研究与绿洲学 [J]. 中国历史地理论丛, 1990(2): 1-24.
- [8] 马彦琳. 干旱区绿洲持续农业与农村发展评价指标体系初步研究 [J]. 干旱区地理, 2000, 23(3): 252-258.
- [9] 苏培玺, 张小军, 刘新民. 荒漠绿洲 PRED 系统特征与可持续发展定量研究 [J]. 地理科学, 2001, 21(6): 519-523.
- [10] 曹广超, 马海州, 等. 柴达木盆地绿洲区可持续发展现状的定量评价研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(3): 28-34.
- [11] 刘普幸, 李筱琳. 层次分析法在生态预警中的应用 - 以酒泉绿洲为例 [J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(5): 15-18.
- [12] 方创琳. 河西走廊绿洲生态系统的动态模拟研究 [J]. 生态学报, 1996, 16(4): 389-396.
- [13] 方创琳, 申玉铭. 河西走廊绿洲生态前景和承载能力的分析与对策 [J]. 干旱区地理, 1997, 20(1): 33-39.
- [14] 曹宇, 欧阳华, 肖笃宁, 等. 额济纳天然绿洲景观变化及其生态环境效应 [J]. 地理研究, 2005, 24(1): 130-139.
- [15] 赵成义, 王玉潮, 李子良, 等. 荒漠绿洲植被变化与景观格局耦合关系的研究 - 以新疆三工河流域为例 [J]. 干旱区地理, 2003, 26(4): 297-304.
- [16] 李凡, 李森. 黑河绿洲可持续发展水平诊断与实力评估 [J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2005, 23(1): 49-53.
- [17] 李森, 李凡, 孙武, 等. 黑河下游额济纳绿洲现代荒漠化过程及其驱动机制 [J]. 地理科学, 2004, 24(1): 61-67.
- [18] 杜巧玲, 许学工, 刘文政. 黑河中下游绿洲生态安全评价 [J]. 生态学报, 2004, 24(9): 1916-1923.
- [19] 石亚男, 刘高焕, 张北飞. 绿洲生态环境动态调控模型及系统概念设计应用 [J]. 地球信息科学, 2003, 9(3): 6-10.
- [20] 刘振波, 倪绍祥. 绿洲生态危机及其预警信息系统 [J]. 环境保护, 2003(2): 31-34.
- [21] 崔卫国, 穆桂金. 基于 GIS 的绿洲空间发育适宜性研究模型的设计 [J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(5): 118-121.
- [22] 陈强, 陈正江. 基于系统动力学的艾比湖沿岸生态环境问题分析及对策 [J]. 水土保持研究, 2005, 12(2): 33-35.
- [23] 裴源生, 孙素艳, 陆垂裕. 绿洲生态稳定性预测 [J]. 水利学报, 2007, 38(4): 434-442.
- [24] 张文修, 吴伟志, 梁吉业, 等. 粗糙集理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1-40.
- [25] 赵云胜, 龙昱. 灰色系统理论在地质学中的应用研究 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1997.
- [26] 罗冠枝, 徐林荣. 基于粗糙集和灰色理论的模糊综合定权法在泥石流危险性评价中的应用 [J]. 安全与环境工程, 2008, 15(3): 1-5.

Evaluation method for ecological stability of oasis based on rough set theory and grey theory

WANG Yaobin^{1,2}, FENG Qi¹, SI Jianhua¹, CHANG Zongqiang¹

(1. The Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, P. R. China; 2. The Lab & Department of Equipment Management, Northwest Normal University, Lanzhou 730000, P. R. China)

Abstract: In view of the shortcomings of the current evaluation methods of the stability of oasis, we put forward a simple and practicable evaluation method based on rough set theory and grey theory, to evaluate the stability of oasis from different aspects of the stability of oasis. Taking Ningxia Oasis as example, we compared with the experts' conclusions, verified and analyzed the feasibility and practicability of this evaluation methods.

Key words: rough set; grey theory; ecological stability of oasis