

## 煤矿废弃地植被恢复潜力评价模型

王莹<sup>1</sup> 李道亮<sup>2,3</sup>

(1. 中国农业大学 经济管理学院,北京 100083; 2. 中国农业大学 工学院,北京 100083;  
3. 现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室,北京 100083)

**摘要** 为了科学评价煤矿废弃地植被恢复潜力,进而确定不同废弃地间植被恢复的优先顺序,根据土壤、地形、气候、废弃地现状各方面因素对植被恢复难易程度的影响,建立了各因素的隶属度函数;将三标度打分法与层次分析法相结合,确定了各因素的权重;采用模糊综合评价-灰色关联优势分析的方法,建立了煤矿废弃地植被恢复潜力评价模型。对辽宁阜新市矿区煤矿废弃地植被恢复潜力进行了评价,评价结果与实际情况相符。该模型能够为确定矿区植被恢复的难易程度以及优先顺序提供决策支持。

**关键词** 煤矿废弃地; 植被恢复潜力; 模糊综合评价

**中图分类号** F 301.24; TD 88

**文章编号** 1007-4333(2005)02-0088-05

**文献标识码** A

## A potentiality evaluation model for revegetation of abandoned lands from coal mining activities

Wang Ying<sup>1</sup>, Li Daoliang<sup>2</sup>

(1. College of Economic and Management, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

3. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

**Abstract** A potentiality evaluation model for revegetation of abandoned land from mining activities was developed for identifying the difficulties and the priority of rehabilitation in different regions. Many factors, such as soil quality, climate, landform and the situations of the abandoned land, are involved in this model. The fuzzy function of every factor was built based on the analysis of its effect on revegetation. A fuzzy integrated evaluation algorithm was developed as the primary algorithm in this model. Fu Xin colliery, Liao Ning province in northeast China was selected as the objective of this case study. The evaluation results proved the method useful from the pilot use.

**Key words** revegetation potential; fuzzy evaluation; coal mining; contaminated land

植被恢复是复垦土地最常用也是最有效的方法之一<sup>[1]</sup>。在对煤矿废弃地进行植被恢复之前,首先要对该地点植被恢复的潜力进行评价,以便确定植被恢复的难易程度以及不同废弃地的恢复顺序。从生态学角度,对于已经丧失了生命支持力的生态系统,不需要进行恢复或重建,只要停止一切破坏活动,让植被与群落自我维持即可<sup>[2]</sup>。从经济角度,由于我国的经济水平还较低,还需要分阶段对煤矿废弃地进行治理,应该优先治理容易恢复的煤矿废弃地。

何书金等人使用加权指数法对矿区废弃地的复垦潜力评价进行了研究<sup>[3]</sup>,由于加权指数法在某些情况下会降低评价的准确性,同时潜力评价等级之间存在着模糊性,因此王德利等人使用模糊综合评判的方法对此作了改进<sup>[4]</sup>,但模糊综合评判法对处于相同级别的废弃地植被恢复的潜力不能进一步排序。笔者综合气候、土壤、地形、废弃地现状4类因素对植被恢复的影响,采用模糊综合评价-灰色优势关联分析法建立了煤矿废弃地植被恢复潜力评价模型。

收稿日期: 2004-08-31

基金项目: 国际科技合作重点项目“矿业废弃地植被恢复决策支持系统研究(2003DF000004)”; 欧盟亚洲信息技术与通信项目 CN/ASIA IT &C/006(89870)

作者简介: 王莹,硕士研究生;李道亮,教授,主要从事信息技术在生态环境领域的应用研究, E-mail: dliangl@cau.edu.cn

## 1 评价指标体系的建立

### 1.1 评价指标的筛选原则

煤矿废弃地植被恢复难易程度的影响因素涉及地形、气候、土壤、废弃地现状等诸多方面。本模型中因素的选择遵循如下原则<sup>[7]</sup>:

1) 直接性: 选择的因素对植物的生长起直接作用。例如海拔和纬度通过改变温度而间接影响植物的生长, 因此只选择温度作为植被恢复的影响因素。

2) 普遍性: 指大部分植物对这种因素变化的反应都是相同的。例如当日照时间变长时, 长日照植

物能够适应, 而短日照植物也许不能很好的适应, 这种因素就不在考虑中。

3) 可行性: 可能有多个指标都可以反映一个因素, 如温度因素的指标包括平均气温、温差、积温、极端温度等, 本模型选择的是那些计算较简单的指标。

### 1.2 评价指标的筛选及权重的确定

根据领域专家的讨论、参考相关文献<sup>[8-13]</sup>且综合以上原则, 笔者选择了坡度、坡向等 4 个方面共 13 个指标作为本模型的基本指标(图 1)。请专家使用三标度法为每个因素打分<sup>[14]</sup>, 采用层次分析法计算出各因素的权重。

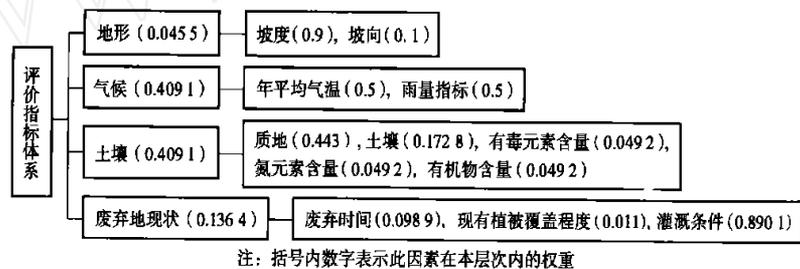


图 1 煤矿废弃地植被恢复潜力评价指标体系

Fig. 1 Indexes system for potentiality evaluation of revegetation for abandoned lands from coal mining activities

在以上指标中, 坡度、土壤容重、pH、氮元素含量、有机质含量和废弃时间的指标值是需要实地测量得到的; 坡向、质地、现有植被覆盖程度、有毒元素含量和灌溉条件的指标值根据给定的分级结合实际条件打分得到; 年平均温度、年平均降雨量由当地的气象资料获得; 雨量指标由公式计算得到: 雨量指标 =  $\frac{\text{年平均降雨量}}{\text{年平均温度}}$ 。

## 2 模糊综合评价-灰色优势关联分析复合模型的建立

### 2.1 评价等级的确定

将煤矿废弃地植被恢复的评价等级分为 A、B、C、D、E 5 个等级, 分别表示植被恢复潜力的易、较易、中、较难和难, 以及地形、气候、土壤、废弃地现状这 4 个方面条件的好、较好、一般、较差和差。

地形、气候等条件决定了植被生长的先天条件, 而土壤、废弃地现状等因素决定了植被生长的后天条件。如果植被生长的条件满足得较好, 则认为植被是容易生长的, 即可认为进行植被恢复较容易。

### 2.2 隶属度函数的确定

隶属度函数的确立目前还没有一套成熟有效的方法, 大多还停留在经验和实验的基础上<sup>[15]</sup>。本研

究中所确定的各指标在 5 个等级内的取值区间见表 1。取各区间中间值作为指标在各级的标准值, 得到第  $i$  个指标在第  $j$  级内的标准值  $S_{ij}$ ,  $i = 1, 2, \dots, 13$ ;  $j = 1, 2, \dots, 5$ 。表 1 中各因素的隶属度函数类型可以分为 3 类:

1) 坡度、有毒元素含量对于 A 级的隶属度函数属于戒上型, 设为类型 ;

2) 雨量指标、质地、结构、有机物含量、植物覆盖面积、灌溉条件、废弃时间对于 A 级的隶属度函数属于戒下型, 设为类型 ;

3) 土壤容重、pH 对于 A 级的隶属度函数属于对称型, 设为类型 。

各类型的隶属度函数图见图 2。

### 2.3 多级模糊综合评价

1) 一级模型。

第  $i$  方面的因素集  $U_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in_i}\}$ , 本模型中  $U_i (i = 1, 2, \dots, 4)$  分别代表地形、气候、土壤和废弃地现状 4 个方面的因素集, 每个因素集共有  $n_i$  个因素。

根据本文中列举的各因素隶属度函数, 分别计算出评价对象的地形、气候、土壤和废弃地现状的单因素评判矩阵

表1 煤矿废弃地植被恢复潜力评价指标各级区间  
Table 1 Range of indexes for the potentiality evaluation model

指标	A(好)	B(较好)	C(中)	D(较差)	E(差)
坡度范围/ (°)	[0, 3)	[3, 7)	[7, 15)	[15, 25)	25
有机物含量/ %	1.7	[1.4, 1.7)	[1.1, 1.4)	[0.8, 1.1)	<0.8
氮元素含量/ %	0.9	[0.3, 0.9)	[0.1125, 0.3)	[0.0875, 0.1125)	<0.0875
年平均温度/	[14.5, 15.5)	[12.0, 14.5), [15.5, 18.0)	[7.0, 12.0), [18.0, 22.0)	[3.0, 7.0), [22.0, 26.0)	<3.0, 26.0
雨量指标	100	[60, 100)	[40, 60)	[20, 40)	[0, 20)
土壤容重/(g cm <sup>-3</sup> )	[1.3, 1.4)	[1.2, 1.3), [1.4, 1.5)	[1.1, 1.2), [1.5, 1.6)	[1, 1.1), [1.6, 1.7)	<1, 1.7
pH	[6, 7)	[4.5, 6), [7, 8)	[3.5, 4.5), [8, 8.5)	[3, 3.5), [8.5, 9)	<3, 9
废弃时间/ a	10	[5, 10)	[3, 5)	[1, 3)	<1
有毒元素含量	[0, 2)	[2, 4)	[4, 6)	[6, 8)	[8, 10]
坡向、质地、现有植被覆盖程度、灌溉条件	[8, 10]	[6, 8)	[4, 6)	[2, 4)	[0, 2)

注：年平均降雨量/年平均温度；用户打分范围。

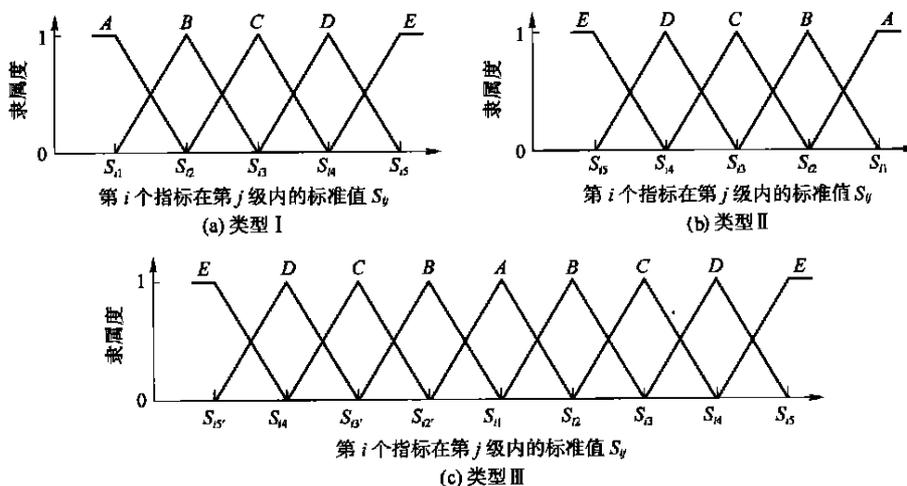


图2 煤矿废弃地植被恢复潜力模型隶属度函数图

Fig.2 Membership functions in potentiality evaluation model

$$R_i = (r_{ijk})_{n_i \times 5} = \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \dots & r_{i15} \\ r_{i21} & r_{i22} & \dots & r_{i25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{in_1} & r_{in_2} & \dots & r_{in_5} \end{bmatrix}$$

其中  $r_{ijk}$  表示第  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, 4$ ) 方面第  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, n_i$ ) 个因素对于等级  $k$  ( $k = 1, 2, \dots, 5$ ) 的隶属度。

权重矩阵  $W_i = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in_i})$ , 表示因素  $u_i$

在第  $i$  方面中的权重,  $\sum_{j=1}^{n_i} w_{ij} = 1$ 。

设第  $i$  方面的模糊综合评价矩阵  $P_i = (p_{i1},$

$p_{i2}, \dots, p_{i5})$ , 令  $P_i = W_i \circ R_i = \frac{p_{i1}}{A} + \frac{p_{i2}}{B} + \dots + \frac{p_{i5}}{E}$ , 其

$$\text{中 } p_{ik} = \sum_{j=1}^{n_i} w_{ij} \cdot r_{ijk}, k = 1, 2, \dots, 5。$$

2) 二级模型。

将第  $i$  方面的模糊综合评价矩阵  $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{i5})$  作为一级模型中的单因素评判矩阵, 权重矩阵  $W = (w_1, w_2, \dots, w_4)$  表示地形、气候、土壤和废弃地现状对于植被恢复潜力影响的权重, 计算二级模糊综合评价矩阵  $P = (p_1, p_2, \dots, p_5)$ 。

$p_l = \max(p_1, p_2, p_3, p_4, p_5)$ , 评价集合  $V$  中第  $l$  个元素为废弃地植被恢复潜力的综合评价结果。

由于本模型的指标体系是多层次的, 因此采用层次的模糊评价方法, 即分别计算出地形、气候、土壤和废弃地现状的评价集, 再将此评价集作为最高

层次上的评判矩阵,计算出最终的评价集。

采用多层次计算与采用单层次计算的结果相同,但前者能够看出地形、气候、土壤和废弃地现状这 4 个方面条件的优劣,以及哪个方面的因素是植被恢复的限制因子。

### 2.4 灰色关联优势分析

设评价对象集合  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ , 共  $n$  个参评对象,对每个对象分别用模糊综合评价法得到综合评价集  $P(i) = (p_1(i), p_2(i), \dots, p_5(i))$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。为更确切地评价各煤矿废弃地植被恢复的潜力,充分利用模糊综合评价的结果所提供的信息,对处于同一评价级别的废弃地的植被恢复潜力作灰色关联优势分析<sup>[16,17]</sup>。

首先建立参考数列  $P_{0j} = \{p_{0j1}, p_{0j2}, \dots, p_{0j5}\}$ , 其中  $j, k = 1, 2, \dots, 5$ ,  $p_{0jk} = \begin{cases} 1 & j = k \\ 0 & j \neq k \end{cases}$ 。对于模糊综合评价结果处于同一级别的评价对象  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_t\}$ , 使用公式

$$r_{ijk} = \frac{\min_i \min_k |p_{0jk} - p_k(i)| + \max_i \max_k |p_{0jk} - p_k(i)|}{|p_{0jk} - p_k(i)| + \max_i \max_k |p_{0jk} - p_k(i)|}$$

$i = 1, 2, \dots, t; j, k = 1, 2, \dots, 5$

计算  $S_i$  对级别  $k$  的关联系数,其中  $r_{ijk}$  为分辨系数,常取  $r = 0.5$ 。

其次,计算灰色关联度  $\mu_{ij} = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 r_{ijk}$ , 设关联

度矩阵  $(r_{ij})_{t \times 5} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{t1} & r_{t2} & \dots & r_{t5} \end{bmatrix}$ 。根据关联

度矩阵,建立关联序对  $(i, q)$ , 其中  $i = \max(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{i5})$ ,  $q$  是与  $i$  相对应的  $r_{ij}$  的  $j$  的数值。

最后将关联序对  $(i, q)$  按  $q$  从小到大、同一  $q$  中按  $i$  从大到小排列,则得到评价对象的关联序。

### 3 实证分析

以辽宁阜新市矿区为试点,对废弃地的植被恢复潜力进行评价。甲地区年平均温度  $6.5 \sim 7.5$ , 年平均降雨量  $420 \sim 540$  mm, 坡度约  $32^\circ$ , 坡向条件一般,质地较差,土壤容重  $1.7 \text{ g/cm}^3$ , pH  $4.5 \sim 5$ , 有毒元素含量较高,氮含量  $0.12\%$ , 有机质含量  $1.2\%$ , 废弃时间 3 a, 现有植被覆盖率很低,灌溉条件差。乙地区年平均温度  $5.1$ , 年平均降雨量  $280$  mm, 坡度约  $20^\circ$ , 坡向条件差,质地较差,土壤容重  $1.1 \text{ g/cm}^3$ , pH  $6 \sim 7$ , 有毒元素含量较低,氮含量  $0.4\%$ , 有机质含量  $0.8\%$ , 废弃时间 10 a, 现有植被覆盖率较低,灌溉条件差。

将以上数据输入本模型,计算结果见表 2。可以看出,2 个地区的综合评价结果都是 D(较难)。使用灰色关联优势分析后,得到关联序对甲为

表 2 辽宁省阜新市煤矿废弃地植被恢复潜力评价结果

Table 2 Result of potentiality evaluation in Fuxin

因素	地区	A	B	C	D	E	评价结果
地形	甲	0	0	0.1	0	0.9	E(差)
	乙	0	0	0	0.95	0.05	D(较差)
气候	甲	0	0.309 5	0.412 7	0.277 8	0	C(一般)
	乙	0	0.081 7	0.429 4	0.488 9	0	D(较差)
土壤	甲	0	0.141 9	0.145 4	0.601 6	0.111	D(较差)
	乙	0.261 1	0.049 2	0.332 5	0.332 5	0.024 6	C, D(中,较差)
废弃地现状	甲	0	0	0.049 5	0.5	0.450 6	D(较差)
	乙	0.049 5	0.049 5	0.005 5	0.895 6	0	D(较差)
总体评价	甲	0	0.184 7	0.239 6	0.427 9	0.147 8	D(较难)
	乙	0.113 6	0.060 3	0.312 4	0.501 4	0.012 3	D(较难)
灰色关联度	甲	0.790 4	0.637 0	0.639 4	0.628 9	0.634 0	(0.790 4, 1)
	乙	0.666 5	0.656 2	0.685 3	0.676 3	0.706 1	(0.706 1, 5)

注:A、B、C、D、E 分别表示植被恢复潜力的易、较易、中、较难和难,以及地形、气候、土壤、废弃地现状这 4 个方面条件的好、较好、一般、较差和差。

(0.790 4, 1), 乙为(0.706 1, 5), 即甲地区的恢复潜力优于乙地区。在这 2 个地区中, 应优先对甲地区进行植被恢复。

#### 4 结束语

基于以上模型, 笔者开发了煤矿废弃地植被恢复潜力评价系统, 用户向本系统中输入煤矿废弃地的地形、气候、土壤和现状 4 个方面的因素值后, 经过计算, 可以分别输出对这 4 个方面优劣程度和植被恢复难易程度的总体评价, 并对评价结果处于同等级的废弃地进行了进一步的评价, 可以确定它们之间进行植被恢复的先后次序。

在阜新市矿区试运行的结果与实际情况相符, 评价结果能够为确定矿区植被恢复的难易程度以及先后顺序提供决策支持, 但本模型中权重的确定还存在着不足之处: 本模型中各因素的权重是不变的, 但实际中对于不同地域的煤矿废弃地, 各因素对植被恢复难易程度的影响不同, 权重应随废弃地的不同而变化。

#### 参 考 文 献

- [1] 席嘉宾, 徐昊娟, 杨中艺. 矿业废弃地复垦的现状与治理对策[J]. 草原与草坪, 2001(2): 11 - 14
- [2] 李俊清, 崔国发. 西北地区天然林保护与退化生态系统恢复理论思考[J]. 北京林业大学学报, 2000, 22(4): 1 - 4
- [3] 何书金, 苏光全. 矿区废弃土地复垦潜力评价方法与应用实例[J]. 地理研究, 2000, 19(2): 54 - 60
- [4] 王德利, 陈秋计. 矿区废弃土地复垦潜力的模糊层次综合评价模型[J]. 北京工业职业技术学院学报, 2002(1): 33 - 36
- [5] 陈健飞, 刘卫民. Fuzzy 综合评判在土地适宜性评价中的应用[J]. 资源科学, 1999, 21(4): 74 - 77
- [6] 刘耀林, 刘艳芳, 夏早发. 模糊综合评判在土地适宜性评价中应用研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1995, 20(1): 71 - 75
- [7] 黄鹏. 我国农地整理质量评价指标体系研究[J]. 生态农业, 2003, 10: 175 - 177
- [8] Bech J, Poschenrieder C, Lugany M, et al. Arsenic and heavy metal contamination of soil and vegetation around a copper mine in Northern Peru[J]. The Science of the Total Environment, 1997, 203: 83 - 91
- [9] Sun S, Dickinson G R, Bragg A L. Direct seeding of *Alphitonia petr* (Rhamnaceae) for gully revegetation in tropical northern Australia[J]. Forest Ecology and Management, 1997, 73: 249 - 257
- [10] Zhang Z Q, Wong M H, Nie X P, et al. Effects of zinc (zinc sulfate) on rhizobia-earleaf acacia (acacia auriculiformis) symbiotic association[J]. Bioresource Technology, 1998, 64: 97 - 104
- [11] Ye Z H, Shu W S, Zhang Z Q, et al. Evaluation of major constraints to revegetation of lead/zinc mine tailings using bioassay techniques[J]. Chemosphere, 2002, 47: 1103 - 1111
- [12] Neel C, Brill H, Nomade A C, et al. Factors affecting natural development of soil on 35-year-old sulphide-rich mine tailings[J]. Geoderma, 2003, 111: 1 - 20
- [13] 王改玲, 白中科. 安太堡露天煤矿排土场植被恢复的主要限制因子及对策[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 38 - 40
- [14] 朱茵, 孟志勇, 阚叔愚. 用层次分析法计算权重[J]. 北方交通大学学报, 1999, 23(5): 119 - 122
- [15] 王季方, 卢正鼎. 模糊控制中隶属度函数的确定方法[J]. 河南科学, 2000, 18(4): 348 - 351
- [16] 阎伍玖. 区域农业生态环境质量综合评价方法与模型研究[J]. 环境科学研究, 1999, 12(3): 52 - 55
- [17] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国, 等. 灰色系统理论教程[M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 1999. 40 - 49