

神府煤田风沙区采煤塌陷地表环境 动态变化的综合评价

赵国平^{1,2}, 李晖^{1,3}, 李旭祥⁴, 张洪江¹, 左合君⁵, 麻保林²

(1. 北京林业大学水土保持学院, 100083, 北京; 2. 陕西省治沙研究所, 719000, 陕西榆林;
3. 国家林业局调查规划设计院, 100714, 北京; 4. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 710049, 西安;
5. 内蒙古农业大学生态环境学院, 010019, 呼和浩特)

摘要: 以神府煤田风沙区 2004 年塌陷区为研究对象, 通过连续 7 a 的野外系统观测, 以采煤塌陷后不同塌陷年限(1~7 a)的地表破坏率、塌陷裂缝残差等 8 个参数作为指标, 利用模糊数学理论建立了风沙区采煤塌陷地表环境变化综合评价模型. 计算表明: 塌陷 1 a 的地表环境变化综合指数为 0.918 4, 属开始变化阶段; 塌陷 2~3 a 的综合指数为 0.731 9~0.635 7, 属地表环境加速变化阶段; 塌陷 4~5 a 的综合指数为 0.404 6~0.316 4, 属地表环境减速变化阶段; 塌陷 6~7 a 的综合指数为 0.281 2~0.264 7, 属地表环境变化趋于减速阶段. 模型评价结果符合实际情况.

关键词: 采煤塌陷区; 地表环境; 模糊数学模型; 综合评价

中图分类号: X826 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)05-0137-06

Fuzzy Model Assessment on Over-Ground Environment Development of Shenfu Mining Subsidence Area

ZHAO Guoping^{1,2}, LI Hui^{1,3}, LI Xuxiang⁴, ZHANG Hongjiang¹, ZUO Hejun⁵, MA Baolin²

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Shaanxi Research Institute for Sand Control, Yulin, Shaanxi 719000, China; 3. The Academy of Forest Inventory and Planning of The State Forestry Administration of China, Beijing 100714, China; 4. School of Human Settlement and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 5. College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agriculture University, Huhhot 010019, China)

Abstract: Taking Shenfu mining subsidence area as example, subsided mining area recovery period is statistically investigated. In seven-year field work from 2004 to 2010, the surface breakage rate, residual value in subsidence crannies, and six other parameters are selected as the assessment factors, and a fuzzy model is hence established to assess the over-ground environment development of Shenfu mining subsidence area. Calculation results indicate that: in one year subsidence, the comprehensive index is 0.918 4, suggesting a diversified stage of over-ground environment development; in two to three years, the index is 0.731 9 to 0.635 7, suggesting an accelerated stage; in four to five years, the index is 0.404 6 to 0.316 4, suggesting a transitional stage; and in six to seven years, the index is 0.281 2 to 0.264 7, suggesting a decelerated stage. The simulation coincides with the practice.

Keywords: subsidence area; overground environment; fuzzy model; comprehensive assessment

收稿日期: 2011-10-31. 作者简介: 赵国平(1979—), 男, 博士生, 陕西省治沙研究所助理研究员; 李旭祥(通信作者), 男, 教授. 基金项目: 陕西省“1311-5”科技创新工程重大科技专项资助项目(2009ZDKG-67); 林业公益性行业科研专项基金资助项目(200804016).

网络出版时间: 2012-03-12

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20120312.1028.002.html>

我国是世界第一产煤大国,煤炭开发显著地影响着我国许多地方的经济发展,同时,煤炭开采常常造成大面积的地表塌陷,尤其是半干旱风沙地带的煤矿,更容易因采煤塌陷而促使地表环境发生变化,严重影响土地结构和功能^[1].采煤塌陷后,由于地表发生扭曲,形成裂缝和不均匀沉降,导致地表植被和矿区微地貌发生变化,另外,区域地下潜水甚至承压水水位的下降,也直接导致地表植被、土壤水分、生物多样性等的变化.如何有效控制塌陷区地表环境演变,以恢复和利用被采矿破坏了的土地,是塌陷区生态恢复工作中的难点和重点问题.地表因采煤塌陷后,随着时间的推移,地表环境也在逐步发生变化,确定采煤塌陷后合理的生态恢复治理时间,是决定矿区复垦工程成功与否的关键.

神府矿区位于榆林市北部半干旱地带的神木和府谷两县境内,区域内采空塌陷状况严重.据统计,截至 2010 年底,全境采空塌陷面积 220 km²,其中神木县最为严重,达 80 多 km²^[2].同时,该区域地处风沙区,地表土壤结构疏松,水资源短缺,因而植被恢复困难^[2-4].因此,本研究以 2004 年塌陷区为对象,进行了连续 7 a 的观测,并利用模糊数学理论建立了评价模型,用于综合评价采煤塌陷区地表环境的演变,进而说明采煤塌陷地区的地表环境变化过程,以期为该区域的生态恢复提供理论指导.

1 基础调查

1.1 塌陷地表特征调查

1.1.1 塌陷地表破损率 2004~2010 年期间,每年 7 月中旬在塌陷区和对照区(非塌陷区)内随机各选取 5 个 10 m×10 m 的样方,调查地表结构破坏程度.

塌陷区地表结构的破坏程度用地表破损率(I_{ss})^[3-4]表示,即样方上的破损面积占样方面积的

百分比

$$I_{ss} = (S_D/S_0) \times 100\%$$
 (1)

式中: S_D 为破损面积(m²); S_0 为样方面积(100 m²).

根据计算出的地表破损率,划分出塌陷区地表破损强度等级,如表 1 所示.

1.1.2 塌陷裂缝残差 在塌陷区随机选取沙丘 3 个,分别在丘顶、迎风坡、背风坡及丘间各随机选取 5 条裂缝,每年测定塌陷裂缝宽度(W_s , cm)、塌陷裂缝落差(H_s , cm)等,重复 5 次.塌陷裂缝的动态变化用塌陷裂缝残差(H_{sw})表示,它表征塌陷裂缝痕迹的可见程度,公式如下

$$H_{sw} = \left(1 - \frac{|W_s - H_s|}{W_s}\right) \times 100\%$$
 (2)

表 1 塌陷区地表破坏强度等级划分

等级	塌陷强度	划分标准
V	极高	$I_{ss} \geq 50\%$
IV	高	$50\% > I_{ss} \geq 35\%$
III	中	$35\% > I_{ss} \geq 20\%$
II	低	$20\% > I_{ss} \geq 10\%$
I	轻度	$I_{ss} < 10\%$
0	无	$I_{ss} = 0$

1.2 土壤水分测定

每年 1 次在塌陷区和对照区,随机在丘顶、迎风坡、背风坡及丘间低地等区域各选取 3 条塌陷裂缝,在其两侧 2 m 内每隔 20 cm 测定塌陷裂缝两边水平及垂直方向的土壤含水率,重复 3 次.

1.3 坡面形态变化观测

每年用标杆法观测塌陷裂缝上缘、塌陷沟槽中部、塌陷裂缝下缘、塌陷裂缝形成的台阶处的风沙蚀积量变化(见图 1).

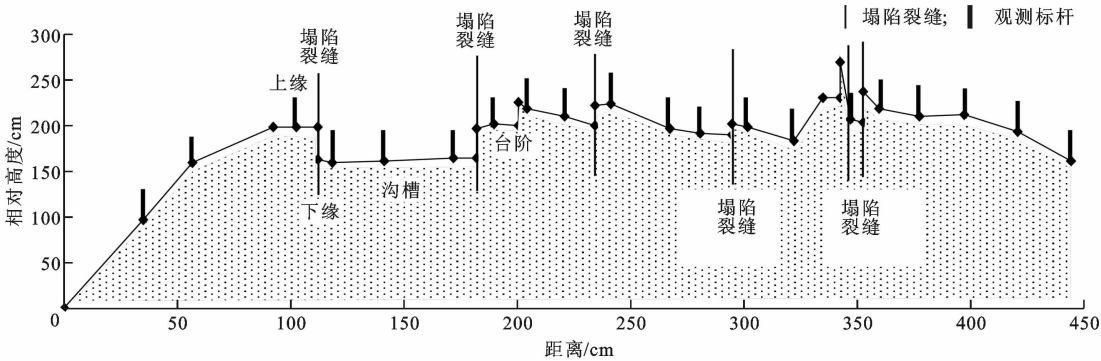


图 1 塌陷区坡面形态变化观测示意图

1.4 风蚀强度观测

每年观测迎风坡坡角、坡中、丘顶以及背风坡坡角、坡中距地面 20 cm 及 2 m 高度处的风速,测定相应位置 0~1 cm、1~10 cm 及 2~10 cm 高度处的输沙量,重复 5 次。风蚀强度定义为单位时间、单位面积的土壤风蚀量,单位为 $\text{g}/(\text{t} \cdot \text{cm}^2)$ 。

1.5 塌陷区植被因子变化调查

在塌陷区和对照区的丘顶、坡中及丘间低地等区域随机选取 5 个 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的样方,每年调查植物种类、高度、冠幅、生长量、植被覆盖度等。

2 地表环境变化模糊模型的建立

设对塌陷区地表环境动态变化趋势 E 作识别的 n 个样本集合

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \tag{3}$$

样本 j 的特性用 m 个指标特征值表示

$$\mathbf{x}_j = [x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}]^T \tag{4}$$

则样本集可用 $m \times n$ 阶指标特征值矩阵表示

$$\mathbf{X} = [x_{ij}] \tag{5}$$

式中: x_{ij} 为样本 j 指标 i 的特征值, $i=1, 2, \dots, m$, $j=1, 2, \dots, n$ 。样本集依据 m 个指标特征值按 c 个级别的指标标准特征值进行识别,则有 $m \times c$ 阶指标标准特征值矩阵

$$\mathbf{Y} = [y_{ih}] \tag{6}$$

式中: y_{ih} 为级别 h 指标 i 的标准特征值, $h=1, 2, \dots, c$ 。

根据相对隶属函数的定义^[3,5-11],建立对塌陷区地表环境动态变化趋势 E 进行识别的参考连续统。确定参考连续统上关于 E 的 2 个极点,然后在参考连续统上定义对 E 的相对隶属函数。

通常有 2 种不同的指标类型:①指标标准特征值 y_{ih} 随级别 h 的增大而减小;②指标标准特征值 y_{ih} 随级别 h 的增大而增大。

对于第 1 类指标,确定指标特征值小于等于指标的 c 级标准特征值对 E 的相对隶属度为 0(左极点),大于等于指标的 1 级标准特征值对 E 的相对隶属度为 1(右极点)。

对于第 2 类指标,确定大于等于指标的 c 级标准特征值对 E 的相对隶属度为 0(左极点),小于等于指标的 1 级标准特征值对 E 的相对隶属度为 1(右极点)。

对以上 2 类指标,其特征值介于 1 级与 c 级标准特征值之间者,对 E 的相对隶属度按线性变化确定,则得指标对 E 的相对隶属函数公式为^[5-8,10-11]

$$r_{ij} = \begin{cases} 0, & x_{ij} \leq y_{ic} \text{ 或 } x_{ij} \geq y_{i1} \\ \frac{x_{ij} - y_{ic}}{y_{i1} - y_{ic}}, & y_{i1} > x_{ij} > y_{ic} \text{ 或 } y_{i1} < x_{ij} < y_{ic} \\ 1, & x_{ij} \geq y_{i1} \text{ 或 } x_{ij} \leq y_{ic} \end{cases} \tag{7}$$

式中: r_{ij} 为样本 j 指标 i 的特征值对 E 的相对隶属度; y_{i1} 、 y_{ic} 分别为指标 i 的 1 级、 c 级标准特征值。类似地,可得级别 h 指标 i 的标准特征值 y_{ih} 对地表环境动态变化趋势 E 的相对隶属函数公式^[5-8,10-12]

$$s_{ih} = \begin{cases} 0, & y_{ih} \leq y_{ic} \\ \frac{y_{ih} - y_{ic}}{y_{i1} - y_{ic}}, & y_{i1} > y_{ih} > y_{ic} \text{ 或 } y_{i1} < y_{ih} < y_{ic} \\ 1, & y_{ih} \geq y_{i1} \end{cases} \tag{8}$$

式中: s_{ih} 为级别 h 指标 i 的标准特征值对 E 的相对隶属度。式(7)、式(8)称为指标对塌陷区地表环境动态变化趋势 E 的相对隶属函数公式。

式(7)、式(8)是以相对隶属度、相对隶属函数的概念与定义为基础的,以参考连续统上的两极及中间的线性变化作为相对统一的参照系。

用指标的相对隶属函数式(7)、式(8)把指标特征值矩阵式(5)、指标标准特征值矩阵式(6)变换为相应的对 E 的相对隶属度矩阵

$$\mathbf{R} = [r_{ij}] \tag{9}$$

$$\mathbf{S} = [s_{ij}] \tag{10}$$

一般地,样本集的 j 个指标对模式识别的影响程度不同,故指标应具有不同的权重。设指标权向量

$$\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_j) \tag{11}$$

满足

$$\sum_{i=1}^j w_i = 1 \tag{12}$$

设 $\mathbf{B}$ 是 $\mathbf{X}$ 到 $\mathbf{Y}$ 的模糊变换,则模糊综合评价为

$$\mathbf{B} = \mathbf{WR} \tag{13}$$

式中: $\mathbf{B}$ 为地表环境动态变化级别特征值矩阵; $\mathbf{W}$ 为权重矩阵; $\mathbf{R}$ 为相对隶属度矩阵。

3 塌陷区地表环境变化综合评价

3.1 评价指标的选取与指标计算

本研究综合考虑气候因素、土壤因素、地形因素及生物因素,建立塌陷区地表环境变化评价指标体系,见表 2。

表 2 塌陷区地表环境变化参评因素及指标体系

准则层	评价指标
气候因素	年均风速(m/s)
	年均降水量(mm)
土壤因素	风蚀性因子(%)
	风蚀强度(g/(t·cm ²))
	有机质含量(g/kg)
	干沙层厚度(cm)
	土壤含水率(%)
地形因素	地表破损率(%)
	塌陷裂缝残差(%)
生物因素	生物多样性指数(%)
	植被覆盖度(%)

对表 2 中的参评指标,运用 SPSS 13.0 软件进行主成分分析后,按照影响程度大小排序,确定地表破损率、塌陷裂缝残差、生物多样性指数、风蚀性因子等 8 个参数作为评价指标,建立模糊评价模型.其中:生物多样性指数采用 Simpson 多样性指数,计算公式为 $D = 1 - \sum P_i^2$ (P_i 为种的个体数占群落中总个体数的比例);风蚀风积面积比(Q_{SE})为不同

塌陷年限风蚀风积面积占塌陷区面积的百分比,简称“风沙蚀积比”;风蚀性因子(C)为塌陷区可蚀性颗粒的百分比;植被覆盖度(R_{VC})指塌陷区的植被覆盖率(%);风蚀强度用风蚀率(I_{WE})表示,为实测风蚀强度与总风蚀强度之比(%);土壤含水率(W_{WS})指实测的土壤含水率(体积分数,%).

3.2 参评因子指标区间划分

根据模糊决策理论^[3,6-8,13-15]和科尔沁土地沙漠化模糊综合评判分类标准^[7],结合神府煤田风沙区塌陷区的实际情况,将研究区域内的地表环境按变化程度大小划分为地表环境开始变化阶段(A)、加速变化阶段(B)、过渡阶段(C)、减速变化阶段(D)和基本稳定阶段(E) 5 个等级,各级别指标值如表 3 所示.

3.3 塌陷区模糊综合评判

不同塌陷年限塌陷区地表环境变化各要素的实测数据如表 4 所示.根据式(7)、式(8)以及表 3、表 4,计算塌陷区地表环境动态变化指标标准值与实测指标特征值的相对隶属度矩阵 R 和 S .

表 3 塌陷区地表环境变化的模糊模型单要素分类标准

评价等级	I_{SS}	H_{SW}	D	Q_{SE}	C	R_{VC}	I_{WE}	W_{WS}
A(开始变化)	≥ 50	≥ 25	≤ 25	30	≥ 30	≤ 30	≤ 10	≥ 7
B(加速变化)	[30, 50)	[20, 25)	(15, 25]	(30, 40]	[20, 30)	[15, 25)	[10, 15)	[5, 7)
C(过渡阶段)	[10, 30)	[10, 20)	(10, 15]	(40, 60]	[5, 20)	[10, 15)	≥ 20	[3, 5)
D(减速变化)	> 10	> 10	(10, 15]	(10, 30]	< 5	≥ 15	< 10	[5, 7)
E(基本稳定)	0	0	> 15	< 10	0	≥ 20	< 5	≥ 7

表 4 塌陷区地表环境变化各要素的实测数据

塌陷时间/a	I_{SS}	H_{SW}	D	Q_{SE}	C	R_{VC}	I_{WE}	W_{WS}
1	50	25(裂缝交错)	33.60	+60(堆积为主)	36.93	36	9.44	6.37
2	30	22.5(裂缝明显)	25.89	+50(堆积为主)	43.14	32	13.76	5.98
3	20	20.09(裂缝可见)	22.74	-60(风蚀为主)	46.27	25	15.20	4.22
4	10	17.33(裂缝可见)	14.97	-55(风蚀为主)	37.25	20	17.90	4.36
5	10	13.51(痕迹可见)	13.90	-30(风蚀为主)	36.45	25	24.40	5.80
6	5	8(痕迹可见)	18.83	-20(局部风蚀)	33.46	30	18.52	5.75
7	3	2(裂缝基本消失)	20.69	-15(局部风蚀)	33.65	32	12.84	6.20
对照区 (非塌陷区)	0	0	32.00	-10(风蚀为主)	25.60	40	8.66	6.41

$R =$

1.00	1.00	1.00	0.40	1.00	1.00	0.33	1.00
0.60	0.80	0.33	0.60	0.67	0.25	0.67	0.50
0.20	0.40	0.00	1.00	0.17	0.00	1.00	0.00
0.20	0.40	0.00	0.40	0.17	0.25	0.33	0.50
0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.50	0.00	1.00

$S =$

1.00	1.00	1.00	1.00	0.55	0.80	0.95	0.98
0.60	0.90	0.61	0.80	0.85	0.60	0.68	0.80
0.40	0.80	0.45	1.00	1.00	0.25	0.58	0.00
0.20	0.69	0.05	0.90	0.56	0.00	0.41	0.06
0.20	0.54	0.00	0.40	0.52	0.25	0.00	0.72
0.10	0.32	0.25	0.20	0.38	0.50	0.37	0.70
0.10	0.08	0.34	0.10	0.39	0.60	0.73	0.90
0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

根据主导因素法^[7,11,15],计算出地表破损率(I_{SS})、塌陷裂缝残差(H_{SW})、生物多样性指数(D)、风蚀性因子(C)、风沙蚀积比(Q_{SE})、植被覆盖度(R_{VC})、风蚀率(I_{WE})、土壤含水率(W_{WS})的权重为

$$\mathbf{W} = (0.213, 0.200, 0.166, 0.132, 0.140, 0.080, 0.041, 0.028)$$

利用式(13),可得地表环境动态变化级别的特征值为

$$\mathbf{B} = (0.893\ 3, 0.577\ 1, 0.319\ 4, 0.246\ 7, 0.122\ 8)$$

为了鉴别地表环境变化类型,先按式(7)、式(8)计算待评定塌陷区的单要素隶属度和地表环境变化综合指数,进而计算隶属度和综合指数对神府煤田塌陷区地表环境变化分类标准综合评价指标的兼容度,然后根据最大兼容度判定所属地表环境变化趋势的类型。

兼容度计算公式为

$$\Pi_{oi} = 1 - (b_{oi} - b_j) \tag{14}$$

式中:下角标 oi 表示待评定塌陷区; b_{oi} 为待评定塌陷区的综合评价指数; b_j 为地表环境变化级别特征值, $1 < j < 5$ 。取 $\max \Pi_{oi}$ 确定地表环境评价等级。

利用式(13)对塌陷区地表环境动态变化各要素的指标特征值矩阵分别按权重 $\mathbf{W} = (0.213I_{SS}, 0.200H_{SW}, 0.166D, 0.132Q_{SE}, 0.140C, 0.080R_{VC}, 0.041I_{WE}, 0.028W_{WS})$ 进行计算,得到模糊综合评价指数,如表 5 所示。

将表 5 中的综合评价指数代入兼容度公式(14),并取最大兼容度, b_{oi} 取表 5 中塌陷 1~7 a 的综合评价指数值, b_j 取与 b_{oi} 相近的值作为判断指数,判断结果如表 6 所示。

表 5 塌陷区地表环境变化类型的综合评价指数

塌陷时间/a	综合指数	塌陷时间/a	综合指数
1	0.918 4	5	0.316 4
2	0.731 9	6	0.281 2
3	0.635 7	7	0.264 7
4	0.404 6	对照区	0.181 7

判别结果为:塌陷 1 a 属地表环境开始变化阶段;塌陷 2~3 a 属地表环境加速变化阶段;塌陷 4~5 a 属地表环境过渡阶段;塌陷 6~7 a 属地表环境变化趋于减速阶段;对照区(非塌陷区)样地属地表环境基本稳定。

表 6 塌陷区地表环境动态变化类型判断结果表

塌陷时间/a	综合指数	级 别 特征值	地表环境 变化类型	评价结果
1	0.918 4	0.893 3	A	开始发展阶段
2	0.731 9	0.577 1	B	加速变化阶段
3	0.635 7	0.577 1	B	
4	0.404 6	0.319 4	C	过渡阶段
5	0.316 4	0.319 4	C	
6	0.281 2	0.246 7	D	减速变化阶段
7	0.264 7	0.246 7	D	
对照区	0.181 7	0.122 8	E	基本稳定阶段

4 结 论

本文建立了神府煤田风沙区不同塌陷年限的地表环境变化模糊综合评价模型,并利用该模型计算了地表环境变化综合指数,得出结论如下。

(1) 塌陷区塌陷 1 a 的综合评价指数为 0.918 4,属地表环境开始变化阶段;塌陷 2~3 a 的综合评价指数为 0.731 9~0.635 7,属地表环境加速变化阶段;塌陷 4~5 a 的综合评价指数为 0.404 6~0.316 4,属地表环境过渡阶段;塌陷 6~7 a 的综合评价指数为 0.281 2~0.264 7,属地表环境变化趋于减速阶段;对照区(非塌陷区)样地的综合评价指数为 0.181 7,属地表环境基本稳定。

(2) 模型计算结果与神府煤田风沙区塌陷地表环境动态变化的实际情况相符,说明以模糊数学理论为基础建立的地表环境评价模型可靠、可行,可用于评价分析区域采煤塌陷区的地表环境变化过程。

(3) 根据本文的研究结果,对于神府煤田风沙地带的采煤塌陷区,建议在采煤塌陷 3 a 后开始生态恢复治理。

参考文献:

[1] 左合君,赵国平,胡春元,等. 采煤塌陷区地表动态演变对风蚀影响研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23 (7): 87-92.
ZUO Hejun, ZHAO Guoping, HU Chunyuan, et al. The effects of ground surface change of the coalmining area on the wind erosion [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23 (7): 87-92.

[2] 榆林市环境保护局. 榆林市环境保护规划(2011~2015)[R]. 陕西榆林:榆林市环境保护局,2011.

[3] 赵国平,左合君,封斌,等. 半干旱区采煤塌陷对风蚀影响强度模糊综合评判[J]. 中国沙漠, 2009, 29(6): 1070-1074.

- ZHAO Guoping, ZUO Hejun, FENG Bing, et al. Fuzzy assessment on wind erosion of subsidence area induced by coal mining in semi-arid area [J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(6): 1070-1074.
- [4] 赵国平, 左合君, 胡春元, 等. 神府-东胜煤田采煤塌陷区塌陷强度与风沙蚀积量相关分析[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6): 176-179.
- ZHAO Guoping, ZUO Hejun, HU Chunyuan, et al. Correlation analysis between regional aeolian sand subsidence intensity and deposition in Shenfu-Dongsheng coal field [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(6): 176-179.
- [5] 陈守煜. 区域水资源可持续利用评价理论模型与方法[J]. 中国工程科学, 2001, 3(2): 33-38.
- CHEN Shouyu. Theory model and a method for qualitative assessment of sustainable development of regional water resources [J]. Engineering Science, 2001, 3(2): 33-38.
- [6] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 38-43.
- [7] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 165-207.
- [8] 谢小良. 基于模糊综合评判下的决策模型[J]. 统计与决策, 2005(11): 57-58.
- XIE Xiaoliang. Fuzzy comprehensive evaluation based assessment of decision model [J]. Statistics and Decision, 2005(11): 57-58.
- [9] 马建军, 李青丰, 张树礼. 灰色关联分析在黑岱沟露天煤矿土壤质量评价中的应用[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(7): 125-129.
- MA Jianjun, LI Qingfeng, ZHANG Shuli. Application of grey system theory to the reclaimed land soil quality evaluation of Hei-Dai-Gou opencast coal mine [J]. 2007, 21(7): 125-129.
- [10] 刘广明, 杨劲松, 何丽丹, 等. 基于模糊综合评判法的新疆典型干旱区土壤盐漠退化风险评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 1-5.
- LIU Guangming, YANG Jingsong, HE Lidan, et al. Fuzzy comprehensive evaluation based assessment of soil alkaline desertification in typical arid area of Xinjiang [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(3): 1-5.
- [11] 唐建新, 徐宁霞, 康钦容. 模糊综合评判在矿山地质环境中的应用[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(5): 145-150.
- TANG Jianxin, XU Ningxia, KANG Qinrong. Application of fuzzy comprehensive evaluation in mine geological environment [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(5): 145-150.
- [12] WAN Cunxu, ZHANG Xiaoyong. Application of fuzzy mathematics in the appraisal of soil quality [J]. Journal of Applied Sciences, 1991, 9(4): 359-365.
- [13] THORP J. Colonization possibilities of North China and Inner Mongolia[J]. Pacific Affairs, 1935, 8: 447-453.
- [14] HAQUE C E. Risk assessment, emergency preparedness and response to hazards: the case of the 1997 Red River Valley flood, Canada [J]. Natural Hazards, 2000, 21(2/3): 225-245.
- [15] 岳东霞, 李自珍. 沙区人工固沙植物水分适宜度模糊数学模型及应用[J]. 兰州大学学报, 2003, 39(3): 60-63.
- YUE Dongxia, LI Zizhen. Fuzzy mathematical model of water fitness for artificial sand-binding vegetation in desert and its application [J]. Journal of Lanzhou University, 2003, 39(3): 60-63.

(编辑 葛赵青)