

模糊数学在土壤质量评价中的应用研究*

王建国 杨林章

单艳红

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(山东农业大学资环学院, 泰安市 271018)

摘要 针对我国土壤质量评价中目前尚未圆满解决的关于确定评价因素鉴定指标、单因素评价以及土壤质量综合评价等关键方法性问题, 依据土壤质量评价中存在的模糊性特点, 提出了利用模糊数学方法建立土壤质量单因素评价和综合评价模型的思想与方法, 进行了实证分析, 获得了满意的结果。

关键词 土壤质量评价, 模糊数学, 模型

中图分类号 S11

土壤作为农用地最重要的组成要素, 其质量状况直接影响农业的可持续发展。近几年来, 随着我国农业经营体制转变以及农业比较利益低下的影响, 我国土壤质量呈现逐步退化趋势。为此, 我国土壤学界于1999年提出了“提高土壤质量, 促进农业持续发展”的战略目标。由于提高土壤质量是建立在对土壤质量现状充分认识的基础上, 因而需要对我国目前土壤质量作出科学评价, 而科学的土壤质量评价是基于其评价方法的科学性, 所以, 研究土壤质量评价方法其意义就不言而喻了。一般而言, 土壤质量评价涉及三方面内容: 一是选择土壤质量评价因素并确定其权重; 二是土壤质量单因素评价; 三是土壤质量综合评价。其中就后两者而论目前仍存在着粗糙、主观性强、评价结果所提供的信息量少等弊端。鉴于此, 本文对其有关内容进行了研究与探索。

1 土壤质量单因素评价与综合评价模型方法研究

1.1 土壤质量单因素评价模型方法研究

土壤是一个十分复杂的动态系统, 其质量优劣是由组成土壤质量诸因素优劣状况决定的。因此, 在对土壤质量评价之前首先应对各评价因素优劣状况作出评价。传统上, 对评价因素评价时, 先人为制定各评价因素指标分级标准, 然后再根据各评价因素指标实测值来确定各评价因素应归的级别。这种对评价因素所作的评价表现的是一种非此即彼的思想。但事实上, 各评价因素在优劣之间是渐变的, 并在这一中间过渡中呈现出亦此亦彼性, 换言之, 对各评价因素的评价具有模糊性。因此, 采用模糊数学方法评价各评价因素, 可获得科学的评价结果。现就应用模糊数学方法对评价因素进行评价的原理和建立评价

* 国家自然科学基金重点项目(49831070)资助

收稿日期: 2000-08-29; 收到修改稿日期: 2000-12-15

模型的思想进行探索。

1.1.1 确定各评价因素对土壤质量的作用方式和各评价因素的鉴定指标 所谓评价因素的鉴定指标是指根据评价因素对作物生长发育的适宜性或限制性而划分出的量值。虽然鉴定指标对不同的作物种类而言是个变数,但对具体的作物来说,每个鉴定指标都有一个或两个临界值^[1]。因此,正确地确定评价因素的鉴定指标既关系到土壤质量评价结果的科学性和精确度,也是一个理论与方法问题,值得对此进行深入研究。从理论和方法论上,定点试验,找出每种作物的生态要求,分别做评价因素指标值与作物产量的散点图,然后对散点图进行拟合,可获得评价因素指标值与作物产量的相关曲线^[2],最后根据相关曲线就可确定出评价因素的鉴定指标。根据前人的研究成果和长期生产经验,评价因素指标值与作物产量之间的关系有如下几种情况^[3],可根据这些情况分别确定各评价因素的鉴定指标。

(1) 评价因素指标值与作物产量成“S”型曲线关系,即在一定的范围内评价因素指标值与作物产量成正相关,而低于或高于此范围评价因素指标值的变化对作物产量影响很小。据此,可确定出此类评价因素的临界值。属于这一情况的评价因素有:土层和耕层厚度、障碍层出现深度、有机质和氮、磷、钾等养分的含量等。

(2) 评价因素指标值与作物产量成抛物线关系,如土壤水分含量、pH值、容重、非毛管孔隙度、渗漏速度、粘粒含量、土壤微量元素含量等。这类评价因素对作物生长发育都有一个最佳适宜范围,超过此范围,随着偏离程度的增大,对作物生长发育的影响越不利,直至达某一值作物不能生长发育。据此,可确定出此类评价因素的临界值。

(3) 评价因素指标值与作物产量成反“S”型曲线关系,即在一定的范围内评价因素指标值与作物产量成负相关,而低于或高于此范围评价因素指标值的变化对作物产量影响很小。此范围的上下界即是此类评价因素的鉴定指标。土壤全盐含量等即属于此种情况。

(4) 评价因素是字符型或定性描述的,如土体构型、母质类型等,对于此类评价因素鉴定指标的确定,应根据长期生产经验进行判断,一般可将最有利于和最不利于作物生长的类型确定为评价因素临界值的上下界。

在此需注意的是,由于不同作物的生态要求不完全相同,因而同一个因素对不同作物生长发育的影响程度亦不同,从而表现为不同作物评价因素鉴定指标的差异。因此,应根据具体作物的生态要求来确定评价因素的鉴定指标。

1.1.2 建立评价因素的隶属函数 前已述及,土层和耕层厚度、障碍层出现深度、有机质和氮、磷、钾等养分含量(X)等与作物产量(Y)成“S”型曲线关系,在建立这些评价因素的隶属函数时,可将“S”型曲线近似为升半梯形分布如图1所示。土壤全盐含量等与作物产量成反“S”型曲线关系,在建立这些评价因素的隶属函数时,可将反“S”型曲线近似为降半梯形分布如图2所示。土壤水分含量、pH值、容重、非毛管孔隙度、渗漏速度、粘粒含量、土壤微量元素含量等与作物产量成抛物线关系,在建立这些评价因素的隶属函数时,可将抛物线近似为梯形分布如图3所示。当评价因素为字符型或定性描述时,可根据长期生产经验用赋值方法来建立隶属函数。

升半梯形分布的隶属函数为^[4]:

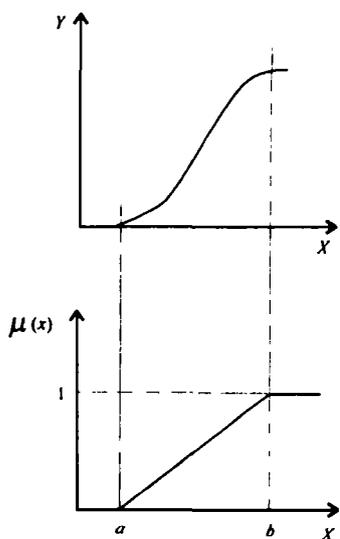


图1 “S”型曲线与升半梯形分布

Fig.1 Distribution of “S” model curve and uprising half trapezoid

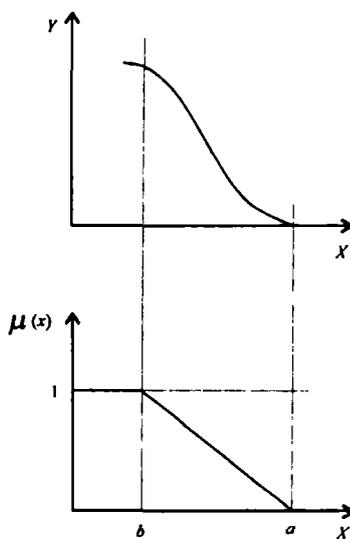


图2 反“S”型曲线与降半梯形分布

Fig.2 Distribution of reverse “S” model curve and falling half trapezoid

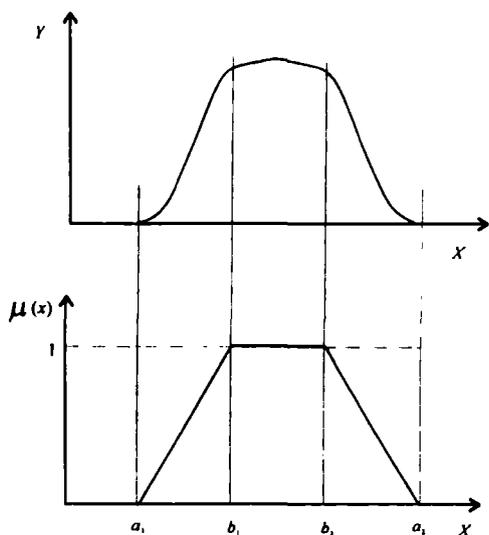


图3 抛物线与梯形分布

Fig.3 Distribution of parabola and trapezoid

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \geq b \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x < b \\ 0 & x \leq a \end{cases}$$

降半梯形分布的隶属函数为^[4]:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \leq b \\ \frac{x-a}{b-a} & a > x > b \\ 0 & x \geq a \end{cases}$$

由于梯形分布可分解为升半梯形分布和降半梯形分布,所以,梯形分布的隶属函数可由升半梯形分布的隶属函数和降半梯形分布的隶属函数组合而成。梯形分布的隶属函数可表示为:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & b_2 \geq x \geq b_1 \\ \frac{x-a_1}{b_1-a_1} & a_1 < x < b_1 \\ \frac{x-a_2}{b_2-a_2} & a_2 > x > b_2 \\ 0 & x \leq a_1 \text{ 或 } x \geq a_2 \end{cases}$$

上述各式中, $\mu(x)$ ——评价因素指标值的隶属函数; x ——评价因素指标值; a, b, a_1, a_2, b_1, b ——分别为评价因素的临界值即鉴定指标。

具体到每种评价因素, 因其各自的特点, 评价模型又有不同的表示方式。现将常用的评价因素的评价模型建立如下:

(1) 土壤养分评价模型。在此土壤养分是指有机质、全氮、速效磷和速效钾。

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \geq x_0 \\ \frac{x}{x_0} & x < x_0 \end{cases}$$

式中: x ——某养分实际含量; x_0 ——某养分上临界值; $\mu(x)$ ——某养分隶属函数。

(2) 土壤有效土层厚度评价模型。

$$\mu(H) = \begin{cases} 1 & H \geq H_0 \\ \frac{H}{H_0} & H < H_0 \end{cases}$$

式中: H ——土壤实际有效土层厚度; H_0 ——土壤有效土层厚度上临界值; $\mu(H)$ ——土壤有效土层厚度隶属函数。

(3) 土壤 pH 值评价模型。

$$\mu(A) = \begin{cases} 1 & A_{02} \leq A \leq A'_{02} \\ \frac{A - A_{01}}{A_{02} - A_{01}} & A_{01} < A < A_{02} \\ \frac{A'_{01} - A}{A'_{01} - A'_{02}} & A'_{01} > A > A'_{02} \\ 0 & A \leq A_{01} \text{ 或 } A \geq A'_{01} \end{cases}$$

式中: A ——土壤实际 pH 值; A_{01}, A'_{01} ——作物不能生长的 pH 值的临界值; A_{02}, A'_{02} ——最适宜作物生长的 pH 值区间的端点值; $\mu(A)$ ——土壤 pH 值隶属函数。

(4) 土壤质地评价模型。土壤质地根据土壤物理性粘粒含量来划分, 因此, 用土壤中物理性粘粒含量的多少来评价土壤质地。据此, 建立土壤质地评价模型如下:

$$\mu(Q) = \begin{cases} 1 & Q_{01} \leq Q \leq Q_{02} \\ \frac{Q}{Q_{01}} & 0 < Q < Q_{01} \\ \frac{100 - Q}{100 - Q_{02}} & Q_{02} < Q < 100 \\ 0 & Q = 0 \text{ 或 } Q = 100 \end{cases}$$

式中: Q ——土壤中实际物理性粘粒含量; Q_{01}, Q_{02} ——最适宜作物生长的土壤中物理性粘粒含量区间的端点值; $\mu(Q)$ ——土壤中物理性粘粒含量隶属函数。

(5) 土壤全盐量评价模型。一般认为, 土壤中全盐量 $S \leq 0.2\%$ 时, 对作物生长无明显影响; 当 $S \geq 1.0\%$ 时, 大部分作物不能正常生长。据此, 建立土壤全盐量评价模型如下:

$$\mu(S) = \begin{cases} 1 & S \leq 0.2\% \\ \frac{1.0\% - S}{1.0\% - 0.2\%} & 0.2\% < S < 1.0\% \\ 0 & S \geq 1.0\% \end{cases}$$

式中: S ——土壤实际全盐量; $\mu(S)$ ——土壤全盐量隶属函数。

(6) 土壤障碍层出现深度评价模型。

$$\mu(B) = \begin{cases} 1 & B \geq B_0 \\ \frac{B}{B_0} & B < B_0 \end{cases}$$

式中: B ——土壤实际障碍层出现深度; B_0 ——对作物生长发育不产生影响的临界障碍层出现深度; $\mu(B)$ ——土壤障碍层出现深度隶属函数。

(7) 地下水位评价模型。

$$\mu(WH) = \begin{cases} 1 & WH \geq WH_0 \\ \frac{WH}{WH_0} & WH < WH_0 \end{cases}$$

式中: WH ——地下水位实际值; WH_0 ——对作物生长发育不产生影响的地下水位临界值; $\mu(WH)$ ——地下水位隶属函数。

(8) 地面坡度评价模型。坡度(G)主要影响地面水的再分配。随着坡度的增加,土壤侵蚀增强。一般地,当坡度 $G \leq 3^\circ$ 时,无明显侵蚀;而坡度 $G = 15^\circ$ 是耕地利用的上限。依此,建立坡度评价模型如下:

$$\mu(G) = \begin{cases} 1 & G \leq 3^\circ \\ \frac{15^\circ - G}{15^\circ - 3^\circ} & 3^\circ < G < 15^\circ \\ 0 & G \geq 15^\circ \end{cases}$$

式中: G ——地面实际坡度; $\mu(G)$ ——地面坡度隶属函数。

1.1.3 关于单因素评价模型的说明 利用单因素评价模型所计算出的评价因素隶属度是介于 0~1 之间的数值。当评价因素隶属度等于 1 时,表明此因素对作物生长发育无限制;而随着偏离 1 程度的增加,对作物生长发育的限制性逐渐增强,直至等于 0,作物不能生长发育或者种植作物严重破坏生态环境(如地面坡度评价因素)。

1.2 土壤质量综合评价模型方法研究

由于土壤质量是各评价因素综合作用的结果,因而在对各评价因素单独评价之后,需要采用一定的方法将单因素评价的结果转换成由各评价因素所构成的土壤质量的评价结果,即要对土壤质量作出综合评价。科学的土壤质量综合评价方法应能同时考虑各评价因素间的交互作用和各评价因素的权重对土壤质量评价结果的影响,但目前的评价方法还很难做到这一点。笔者在综合分析和研究了目前常用的综合评价方法基础上,提出如下应用模糊数学中模糊集的加权综合方法^[5]来建立土壤质量综合评价的数学模型:

$$\mu = \prod_{i=1}^n (\mu(i))^w$$

式中: μ ——土壤质量隶属度即土壤质量综合评价指数; $\mu(i)$ ——第 i 个评价因素的隶属度; W_i ——第 i 个评价因素的权重; Π ——连乘符; n ——评价因素的数目。

土壤综合评价模型的物理意义是: $\mu(i)$ 是各评价因素的隶属度, 它的大小体现各评价因素的优劣; W_i 为各评价因素的权重, 它的大小反映各评价因素的重要性; $(\mu(i))^W$ 体现各评价因素对土壤质量的贡献率; 连乘运算体现各评价因素间的交互作用(最小因子限制定律)。由此可见, 上述土壤质量综合评价模型充分考虑了评价因素指标值、评价因素权重和评价因素间交互作用对土壤质量的共同影响, 表达科学合理、计算简捷方便, 所得结果即土壤质量隶属度能综合反映出土壤质量的优劣状况。

由土壤质量综合评价模型计算所得出的土壤质量隶属度即土壤质量综合评价指数是介于 0~1 之间的数值。当土壤条件对作物生长发育无任何限制时, 土壤质量指数为 1; 而随着土壤条件对作物生长发育限制程度的增加, 土壤质量指数逐渐变小, 直到土壤条件差到作物不能生长发育时, 土壤质量指数变为 0。

2 实证分析

以山东省泰安市泰山区为例, 对上述土壤质量评价模型方法进行了验证。首先, 运用

表1 评价单元评价因素指标值及其权重

Table 1 Index value and weight of evaluation factors

评价单元 Unit	土层厚度 Thickness of soil layer (m)	坡度 Slope Gradient (°)	质地 Soil texture (%)	障碍层 Depth of obstacle horizon (m)	有机质含量 Content of organic matter (g kg ⁻¹)	碱解氮含量 Content of alkali- hydrolyzed nitrogen (mg kg ⁻¹)	速效磷含量 Content of rapidly available phosphorus (mg kg ⁻¹)	速效钾含量 Content of rapidly available potassium (mg kg ⁻¹)	地下水埋深 Depth of underground water (m)
	0.201 ¹⁾	0.170	0.148	0.128	0.110	0.061	0.053	0.047	0.082
1	0.55	≤2°	17.23	0.55	6.96	43.31	3.75	76.16	>5
2	0.55	≤2°	17.23	0.55	6.96	43.31	3.75	76.16	>5
3	0.55	(2°, 6°]	17.23	0.55	6.96	43.31	3.75	76.16	>5
4	0.55	(2°, 6°]	17.23	0.55	6.96	43.31	3.75	76.16	>5
5	0.55	(6°, 15°]	17.23	0.55	6.96	43.31	3.75	76.16	>5
6	1.10	≤2°	26.15	无	8.96	52.23	4.77	90.07	>5
7	1.10	≤2°	26.15	无	8.96	52.23	4.77	90.07	>5
8	1.10	(2°, 6°]	26.15	无	8.96	52.23	4.77	90.07	>5
9	1.10	(2°, 6°]	26.15	无	8.96	52.23	4.77	90.07	>5
10	1.10	(6°, 15°]	26.15	无	8.96	52.23	4.77	90.07	>5
11	1.10	(15°, 25°]	26.15	无	8.96	52.23	4.77	90.07	>5
12	1.50	≤2°	24.23	无	10.10	59.10	6.64	87.55	1.5
13	1.50	(2°, 6°]	24.23	无	10.10	59.10	6.64	87.55	1.5
14	0.10	(6°, 15°]	8.49	0.10	8.20	36.70	2.30	50.46	>5
15	0.10	(15°, 25°]	8.49	0.10	8.20	36.70	2.30	50.46	>5
16	0.40	(2°, 6°]	13.43	0.40	6.30	33.80	2.70	65.14	>5
17	0.40	(6°, 15°]	13.43	0.40	6.30	33.80	2.70	65.14	>5
18	1.50	≤2°	37.73	0.50	10.26	50.05	4.58	98.64	3~5

1) 评价因素的权重。

一定的原则和方法划分了评价单元、确定了参评因素及其权重,评价单元评价因素指标值及其权重列于表 1。在此基础上,依据当地作物的生态要求,确定了各评价因素的临界值(见表 2);然后利用上述所建立的土壤质量评价模型方法分别对各评价单元土壤质量进行了评价,评价结果列于表 3。经实地考察验证,评价结果完全符合评价区的实际情况。这表明文中提出的土壤质量评价模型方法是可行的。

表2 各评价因素的临界值

Table 2 Critical value of evaluation factors

土层厚度 Thickness of soil layer (m)	坡度 Slope gradient (°)	质地 Soil Texture (%)	障碍层深度 Depth of obstacle horizon (m)	有机质含量 Content of organic matter (g kg ⁻¹)	碱解氮含量 Content of alkalhydro- lyzable nitrogen (mg kg ⁻¹)	速效磷含量 Content of rapidly available phosphorus (mg kg ⁻¹)	速效钾含量 Content of rapidly available potassium (mg kg ⁻¹)	地下水埋深 Depth of underground water (m)
1.00	2° ~ 15°	20~40	1.00	15	100	30	120	2

表3 评价单元各评价因素隶属度与土壤质量综合评价指数

Table 3 Dependence degree of evaluation factors and indexes for integrated evaluation of soil quality

评价单元 Unit	土层厚度 Thickness of soil	坡度 Slope gradient	质地 Soil texture	障碍层深度 Depth of obstacle horizon	有机质含量 Content of organic matter	碱解氮含量 Content of alkalhydro- drolyzable nitrogen	速效磷含量 Content of rapidly available phosphorus	速效钾含量 Content of rapidly available potassium	地下水埋深 Depth of underground water	综合评价指数 Synthesis evaluation index
1	0.55	1	0.86	0.55	0.46	0.43	0.13	0.64	1	0.62
2	0.55	1	0.86	0.55	0.46	0.43	0.13	0.64	1	0.62
3	0.55	0.86	0.86	0.55	0.46	0.43	0.13	0.64	1	0.60
4	0.55	0.86	0.86	0.55	0.46	0.43	0.13	0.64	1	0.60
5	0.55	0.43	0.86	0.55	0.46	0.43	0.13	0.64	1	0.53
6	1	1	1	1	0.60	0.52	0.16	0.75	1	0.81
7	1	1	1	1	0.60	0.52	0.16	0.75	1	0.81
8	1	0.86	1	1	0.60	0.52	0.16	0.75	1	0.79
9	1	0.86	1	1	0.60	0.52	0.16	0.75	1	0.79
10	1	0.43	1	1	0.60	0.52	0.16	0.75	1	0.70
11	1	0	1	1	0.60	0.52	0.16	0.75	1	0
12	1	1	1	1	0.67	0.59	0.22	0.73	0.75	0.82
13	1	0.86	1	1	0.67	0.59	0.22	0.73	0.75	0.80
14	0.1	0.43	0.43	0.1	0.55	0.37	0.08	0.42	1	0.26
15	0.1	0	0.43	0.1	0.55	0.37	0.08	0.42	1	0
16	0.4	0.86	0.67	0.4	0.42	0.34	0.09	0.54	1	0.49
17	0.4	0.43	0.67	0.4	0.42	0.34	0.09	0.54	1	0.44
18	1	1	1	0.5	0.68	0.51	0.15	0.88	1	0.76

3 结 论

1. 利用模糊数学方法评价土壤质量是可行的。

2. 利用模糊数学方法评价土壤质量是科学的。因为,一是充分利用了土壤质量评价中所存在的模糊性特点;二是充分考虑了评价因素指标值、评价因素权重和评价因素间交互作用对土壤质量的共同影响。

3. 利用模糊数学方法评价土壤质量其结果提供了较多、较准确的信息。一是从单因素评价结果可获得评价因素优劣的准确信息;二是从土壤质量综合评价结果可获取土壤质量优劣的准确信息。

参 考 文 献

1. 联合国粮农组织. 土地评价纲要. 土壤丛书, 32 号. 罗马. 1976. 15
2. 梁朝仪主编. 土地评价. 郑州: 河南科学技术出版社, 1992. 99~100
3. 沈思渊. 土壤资源评价指标的研究. 见: 中国自然资源研究会青年协会编辑. 自然资源评价与决策研究. 北京: 科学出版社, 1990. 130
4. 刘黎明, 张军连, 张凤荣等编著. 土地资源调查与评价. 北京: 科学技术文献出版社, 1994. 250~251
5. 汪培庄, 韩立岩. 应用模糊数学. 北京经济学院技术出版社, 1989. 209

APPLICATION OF FUZZY MATHEMATICS TO SOIL QUALITY EVALUATION

Wang Jian-guo Yang Lin-zhang

(*Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

Shan Yan-hong

(*College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian 271018*)

Summary

In view of some unresolved key methodological problems (such as defining diagnostic criteria of evaluation factors, single factor evaluation and integrated evaluation of soil quality) in soil quality evaluation at present in China and being due to fuzziness in soil quality evaluation, this paper puts forward the idea and methods for establishing single factor evaluation and integrated evaluation models by applying fuzzy mathematics. The evaluation models are applied and verified with satisfactory results.

Key words Soil quality evaluation, Fuzzy mathematics, Model