

基于 GIS 的土壤质量模糊变权评价*

胡月明¹ 万洪富² 吴志峰² 吴谷丰³ 李华兴^{1†}

(1 华南农业大学地理信息系统研究室, 广州 510642)

(2 广东省土壤与生态环境研究所, 广州)

(3 佛山教育学院数学系, 广东佛山)

摘 要 以广东省东莞赤红壤农业现代化实验区为例, 在地理信息系统(GIS)技术和数学模型的支持下, 应用 ArcInfo 进行空间数据采取、处理与分析, 采用叠置分析的方法, 以评价因素的组合确定评价单元; 采用层次分析法确定评价因素的权重; 在对评价标准进行模糊化处理后, 建立变权评价模型进行土壤质量评价, 应用 ArcView GIS 绘制了评价结果图, 并对变权评价结果与常权评价结果进行了比较与分析。结果证明, 采用变权模型进行土壤质量评价, 比常权评价更能反映土壤质量的实际情况。

关键词 地理信息系统, 土壤质量, 评价, 变权

中图分类号 S126

土壤质量的评价与监测是评价和重新设计持续性的土壤与土地系统的一个基础^[1]。尽管北美及欧洲的一些土壤学家在这些方面已取得了许多重要进展^[2,3], 但是, 迄今为止, 还没有公认的或统一的土壤质量指标和量化的评价方法^[4]。将 GIS 技术与数学模型结合起来, 建立土壤信息系统和新的土壤质量评价模型, 对于土壤质量评价研究和土壤资源可持续利用具有重要意义。

东莞赤红壤现代化农业试验区位于广东省东莞市东桥头镇, 北纬 23°01', 东经 114°06', 区内主要土壤类型为赤红壤和水稻土, 地貌类型包括低丘台地、冲积平原和低洼积水地, 代表了广东省 70% 的农业用地类型。该实验区是国家和广东省“八五”、“九五”科技攻关项目“广东赤红壤区现代化创汇农业开发研究”的实验基地, 华南农业大学、广东省农科院、广东省生态环境与土壤研究所等单位在过去 8 年中进行了区内的土壤背景值及其变化、农业生态、资源利用、种植养殖等多方面的研究, 积累了大量的基础数据。本研究在对区内土壤及其形成条件进行调查分析、建立土壤资源信息系统的基础上, 主要解决了土壤质量评价中 GIS 与定量数学模型的结合, 以及评价模型的变权等问题。

* 广东省自然科学基金(批准号: 980150)、广东省科技创新百项工程项目(99B05801G)及国家“九五”攻关项目(95-004-03-10)共同资助

† 通信作者

收稿日期: 2000-12-27; 收到修改稿日期: 2001-04-10

1 评价程序和方法

1.1 评价因素的选择及其权重的确定

1.1.1 评价因素的选择 土壤质量评价的评价因素应从影响土壤利用的全部自然因素和社会经济因素进行综合选择。根据东莞实验区土壤资源的特点, 结合其他研究成果和专家意见, 选取地面坡度、坡向、土壤质地、土壤 pH 值、土壤有机质含量、土壤速效磷含量、土壤速效钾含量、土地利用类型等因素作为东莞实验区的土壤质量评价因素(见图 1)。其中地形因素(坡度、坡向)的评价数据应用 ArcInfo 的地形分析功能提取; 土壤因素(土壤质地、土壤 pH 值、土壤有机质含量、土壤速效磷含量、土壤速效钾含量)数据通过实地调查与采样分析获得; 土地利用类型数据通过实地勾绘调查获得。

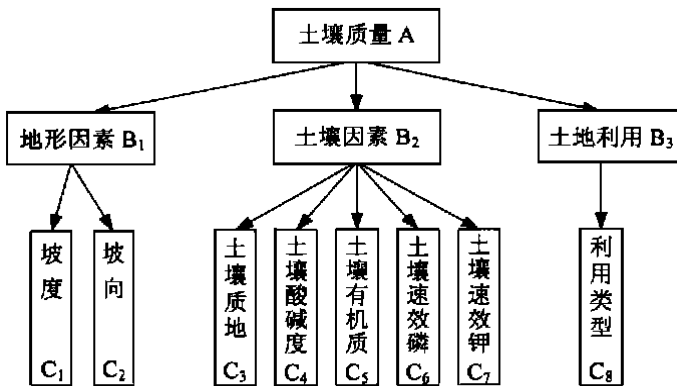


图 1 东莞实验区土壤质量评价因素

Fig. 1 Soil quality evaluation factors for Dongguan experimental field

1.1.2 评价因素权重的确定 东莞实验区土壤质量评价采用的数据是图 1 中 C 层因素的值, 故必须得到 C 层因素对土壤(即 A 层)的权重值, 称之为 G-A 权重。为此, 我们采用层次分析法(AHP 方法)来处理, 首先计算 C 层对 B 层的权重值(G-B 权重)和 B 层对 A 层的权值(B-A 权重), 然后由这两类权重求 G-A 权重。G-B 权重与 B-A 权重算法一样。现以 B_1, B_2, B_3 对 A 的权重计算为例说明计算步骤。

(1) 判断矩阵构造

经 15 位同行专家讨论, 得到各判断矩阵, 其中 A-B 判断矩阵 $P = (p_{ij})$ 如下:

$$A = \begin{matrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{matrix} \begin{pmatrix} B_1 & B_2 & B_3 \\ 1 & 1/2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 \end{pmatrix}$$

(2) 最大特征根与特征向量求算

特征向量就是 B_1, B_2, B_3 对 A 的权向量。 $W = (w_1, w_2, w_3)$ 。当 P 的阶数大时, 可按如下“和法”近似地求出特征向量:

$$w_i = \frac{\sum_j p_{ij}}{\sum_{i,j} p_{ij}} \tag{1}$$

其中 p_{ij} 为 P 的第 i 行第 j 列的元素。而

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \frac{(PW)_i}{(W)_i} \tag{2}$$

其中 $(W)_i$ 表示 W 的第 i 个分量。

(3) 一致性检验

计算一致性比例 CR :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{3}$$

$$CR = CI / RI$$

式中 CI 为一致性指标, RI 为平均随机一致性指标, RI 的值可从表 1 中查得。

表 1 1~ 10 阶矩阵的平均随机一致性指标值

Table 1 RI value of 1~ 10 rank matrix

矩阵阶数 Matrix rank	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI 值	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

表 2 各评价因素权重计算结果

Table 2 Weight of evaluation factors

	B_1	B_2	B_3	G-A 权重 G-A weight
	B-A 权重 B-A weight			
	0.308 8	0.529 5	0.161 7	
C_1	0.75			0.231 5
C_2	0.25			0.077 3
C_3		0.387 4		0.152 7
C_4	G-B 权重	0.189 1		0.100 4
C_5	G-B weight	0.235 2		0.124 9
C_6		0.172 7		0.090 2
C_7		0.115 6		0.061 3
C_8			1	0.161 7

若 $CR < 0.1$, 则说明判断矩阵满足一致性。否则, 调整判断矩阵, 重新运算。

对判断矩阵 P , 由公式(1)、(2)和(3)得:

$$W = (0.308 8, 0.529 5, 0.161 7)$$

$$\lambda_{\max} = 3.011 18$$

$$CI = 0.011 18/2, RI = 0.58$$

$$CR = CI/RI < 0.1$$

故一致性得以满足。

按照上述方法, 求出 G-B 权重和 B-A 权重。将 G-B 权重乘以相应的 B-A 权重即可计算出 G-A 权重。计算结果如表 2 所示。

1.2 评价单元的划分

评价单元是土壤质量评价的基本单位。结合 GIS 技术的特点和数据来源, 本研究选择以评价因素的组合确定东莞实验区土壤质量评价单元^[5]。

1.2.1 单因素图层数字化与处理 评价所需的土壤质地、土壤 pH 值、土壤有机质含量、土壤速效磷含量、土壤速效钾含量、土地利用类型图及相关的土壤类型图、等高线图等图件采用扫描和屏幕数字化的方法输入计算机, 相应的属性数据采用计算机键盘输入。

坡度图和坡向图则通过建立东莞实验区数字地形模型(DTM)来获取^[6]。在 ArcInfo 软件支持下, 首先对等高线、高程点、陡坎等图层进行数字化和编辑, 并建立拓扑关系。然后应用 TIN 模块建立数字高程模型, 生成不规则三角网(TIN)。最后在 TIN 中分别提取坡度图和坡向图。

1.2.2 拓扑叠加分析 采用 ArcInfo 的多边形拓扑叠加功能^[6], 通过对各评价因素的单因素图层, 即地面坡度、坡向、土壤质地、土壤 pH 值、土壤有机质含量、土壤速效磷含量、土壤速效钾含量、土地利用类型图等图层进行叠置分析, 用生成图层的图斑(1438 个)作为东莞实验区土壤质量评价的评价单元。

1.3 评价标准的确定及其模糊化处理

1.3.1 评价标准的确定 根据东莞实验区内多年实验研究的结果, 结合全省土壤普查和土地利用详查的成果资料和专家建议, 给出东莞实验区土壤质量评价因素的等级标准, 见表 3。

表 3 东莞实验区土壤质量评价标准

Table 3 Criteria for soil quality evaluation of Dongguan experimental field

土壤质量等级 Rank of soil quality	I	II	III	IV
土地利用类型	水田、菜地	园地	牧草地	建设用地/未利用地
土壤质地	壤质	粘壤质、砂壤质	粘质、砂质	粗骨
坡向(°)	< 6	6~ 15	15~ 25	≥25
坡度(°)	< 22.5 或 ≥292.5	202.5~ 292.5	22.5~ 112.5	112.5~ 202.5
有机质含量(%)	> 3	2~ 3	1~ 2	< 1
速效磷含量(mg kg ⁻¹)	> 20	10~ 20	5~ 10	< 5
速效钾含量(mg kg ⁻¹)	> 150	100~ 150	50~ 100	< 50
pH 值	6.5~ 7.5	5.5~ 6.5	4.5~ 5.5	< 4.5
等级分值	4	3	2	1

1.3.2 评价标准的模糊化处理 上述土壤质量评价标准中, 土壤质量等级依赖于评价因素值所处的区间, 如对坡度的依赖关系中, 有些相差无几的两个坡度(如 5.9°与 6.1°)分属不同两个级别, 而有些相差甚大的两个坡度(如 6.1°与 4.9°)属于同一个级别。可见

这类评价标准存在一定程度的局限性。为了得到更精确的评价结论,我们借鉴模糊数学的思想^[7],在上述评价标准的基础上引入评价因素对土壤质量的隶属函数概念,为此我们用 $[0, 4]$ 上的数 I 来表示土壤质量, I 越大,质量越好。这样, I 可以看作评价因素 X_1, \dots, X_n 的函数,即

$$I = f(X_1, \dots, X_n)$$

如果因素 $X_k (k \in \{1, \dots, m\})$ 与土壤质量的依赖关系可用表4表示。则定义 X_k 对土壤质量的隶属函数为连接点 $(0, 0), (a_1, 1.5), (a_2, 2.5), (a_3, 3.5)$ 的折线,对应的分段线性函数 $\phi(x)$,且该函数当 $x > 1.5a_3 - 0.5a_2$ 时函数值为4,即

$$\phi(x) = \begin{cases} 1.5x/a_1, & x \in [0, a_1] \\ 1.5 + (x - a_1)/(a_2 - a_1), & x \in (a_1, a_2] \\ 2.5 + (x - a_2)/(a_3 - a_2), & x \in (a_2, 1.5a_3 - 0.5a_2] \\ 4, & x \geq 1.5a_3 - 0.5a_2 \end{cases}$$

表4 评价因素对质量等级的隶属关系

Table 4 Subjection of evaluation factors to soil quality

因素值 X_i Value of evaluation factor	$[0, a_1]$	$[a_1, a_2]$	$(a_2, a_3]$	$(a_3, +\infty)$
质量等级	IV	III	II	I

表4表明因素值越大,土壤质量越好的情况,对因素值越大,土壤质量越差的情况也引入类似的隶属函数,引入隶属函数后,土壤质量连续依赖于评价因素,从而使评价结果更切合实际。

1.4 质量等级的评定

1.4.1 变权评价模型 在土壤质量评价中,不仅要考虑各评价因素的相对重要性,还要考虑它们的组态,这两方面的作用可同时体现在可变的权重之中。记评价因素集为 $C = (C_1, \dots, C_m)$,如果评价单元的某个评价因素的值十分“糟糕”,以致于即使别的评价因素值很理想,该单元的质量也很差,如某个单元严重缺水,作物不能生长,该单元的质量应认为很差。但若用常权来计算综合评价,很难反映出这一特征,因此我们在东莞实验区土壤质量评价中采用了变权评价的方法。其思想是“惩罚”那些特别差的指标,“惩罚”方法是将“差”的因素的权重调整,从而降低综合评价。

(1) 变权的构造

李洪兴教授给出了变权状态变权向量的公理化定义^[8],为许多实际问题提供了重要的科学综合模式。为了应用的需要,我们给出惩罚型局部状态变权向量的定义。

定义1 给定映射 $S: [a_1, b_1] \times \dots \times [a_m, b_m] \rightarrow (0, +\infty)^m$,称 $S(X) = (s_1(X), s_2(X), \dots, s_m(X))$ 为惩罚型局部状态变权向量,如果满足条件:

- (1) 对每个 $i \in \{1, 2, \dots, m\}$,存在 $a_i \in [a_i, b_i]$ 解得 $s_i(X)$ 关于 x_i 的偏导数在 $[0, a_i]$ 上小于零,在 $(a_i, b_i]$ 等于零。
- (2) $S(X)$ 关于 X 连续。
- (3) 当 $0 \leq x_i \leq x_k \leq \min(\alpha_i, \alpha_k)$ 时, $s_i(X) \geq s_k(X)$

其中 $X = (x_1, x_2, \dots, x_m) \in [a_1, b_1] \times \dots \times [a_m, b_m]$ 。

我们称定义 1 中 a_i 为惩罚水平, 当 $x_i < a_i$ 时, 对第 i 个因素进行惩罚。基于惩罚型局部状态变权向量和常数权向量, 就可以按下述定义构造变权向量。

定义 2 称常权向量 $W_0 = (w_1^0, w_2^0, \dots, w_m^0)$ 与状态变权向量 $S(X)$ 的 Hadamard 积

$$W(X) = (w_1(X), w_2(X), \dots, w_m(X)) = \frac{W_0 \cdot S(X)}{\sum_{j=1}^m w_j^0 s_j(X)}$$

为变权向量, 其中

$$w_j(X) = \frac{w_j^0 s_j(X)}{\sum_{j=1}^m w_j^0 s_j(X)}$$

从定义 2 中可看出, 如果 $S(X)$ 为惩罚局部变权向量, 从变权向量的构造中可以看出, 当 $x_i < a_i$ 时, x_i 对应的权重增大, 而 x_i 的值小, 因而加权和变小, 达到了对第 i 个因素进行惩罚的目的。我们称定义 1 中 a_i 为惩罚水平。

(2) 综合评价值的计算

设评价单元的指标值为 $X = (x_1, \dots, x_m)$, 则按如下公式计算综合评价值 I_X

$$I_X = W(X)X^T = \sum_{j=1}^m w_j(X)x_j$$

1.4.2 初始数据的处理 东莞实验区土壤质量分为 4 级, 故把评价因素的原始数据转化为 $[0, 4]$ 上的数, 数值越大, 表示土壤质量越好。

记评价因素集 C , 设 $C_k \in C$, C_k 的原始数据值为 $X_k = (\hat{x}_{1k}, \hat{x}_{2k}, \dots, \hat{x}_{nk})$, 其中 \hat{x}_{jk} 为第 j 个评价单元的第 k 个评价因素原始数据。经叠叠分析获取的各评价单元的原始评价数据有两类, 一类是评价因素的指标级别, 如土壤质地; 另一类是评价因素具体的数值指标, 如土壤有机质含量。对于前者, 将一、二、三、四级分别转化为数 4、3、2、1; 关于后者, 用上文给出的隶属函数转化为区间 $[0, 4]$ 上的数值, 这样每个指标数据都变为 $[1, 4]$ 上的数值。从而得到各评价单元内各评价因素的数据矩阵:

$$\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{pmatrix}$$

其中 $x_{ij} \in [0, 4]$ 是第 i 个评价标准的第 j 个因素值 \hat{x}_{ij} 经初始化处理后的值。

1.4.3 变权的确定 常权向量

$$W_0 = (w_1^0, w_2^0, \dots, w_m^0)$$

在上文中已经给出, 在此只需给出状态变权向量就能确定变权向量, 令状态变权向量 $S(X) = (s_1(X), s_2(X), \dots, s_m(X))$, 其中

$$s_j(X) = \begin{cases} \log_{\alpha} x_j, & x_j \in (0, \alpha_j) \\ 1, & x_j \in [\alpha_j, 4] \end{cases}$$

式中惩罚水平 $\alpha_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 根据评价因素对土壤质量的影响情况而确定, 由于各指标值经初始化后都变成了 0 与 4 之间的数, 故我们可以将 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 都取同一个值, 在此都取 0.8。于是按定义 2 得到变权向量

$$W(X) = ((w_1(X), w_2(X), \dots, w_m(X)))$$

其中

$$w_j(X) = \frac{w_j^0 s_j(X)}{\sum_{j=1}^m w_j^0 s_j(X)}$$

由于 $\lim_{x_j \rightarrow 0} s_j = +\infty$, 故指标值 x_i 越小, 惩罚程度越大。

1.4.4 计算综合评价值 设评价单元 X_l 的因素值经初始化后变为 $(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1m})$, 按如下公式计算综合变权评价价值:

$$I_l = \sum_{j=1}^m w_j(X) x_{lj}$$

此处 0.8 为惩罚水平。为了便于比较, 我们还计算了各单元的常权综合评价值。现将某一评价单元常权和变权评价结果列于表 5。

从表 5 中可以看出, 由于该单元有两个因素值小于惩罚水平, 因而它们相应的权重调高, 最终使综合评价价值降低。

表 5 常权和变权评价结果比较

Table 5 Comparison between constant weight and variable weight evaluation results

评价因素 Evaluation factor	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	综合评价价值 Comprehensive evaluation
因素值	3.68	4.00	3.00	1.32	0.69	4.00	0.31	3.00	
常权重	0.2315	0.0773	0.2057	0.1004	0.1249	0.0637	0.0348	0.1617	2.7030
变权重	0.1723	0.0575	0.1137	0.0747	0.1546	0.0672	0.2396	0.1204	2.3048

2 评价结果与结论

对每个评价单元都用常权与变权两种方式计算综合评价值, 应用 ArcInfo 的 DISSOLVE 命令, 将评价结果属于同一土壤质量等级的相邻评价单元合并, 应用 ArcView 制图, 分别得出东莞实验区土壤常权和变权评价结果图, 并计算出各个质量等级土壤资源的面积, 见图 2(图例中 I 等、II 等、III 等、IV 等代表土壤质量等级) 和表 6。

在常权与变权 2 种评价的结果中, 全部 1438 个评价单元中的 703 个单元综合评价值不同, 其中 255 个评价单元分属于不同的土壤质量等级。从表 6 和图 2 可以看出, 采用变权的方法得出的评价结果中, 土壤质量为 I 等的面积与常权评价结果相同, 说明变权对各种评价要素均比较优越的土壤质量等级没有影响; II 等面积比常权评价结果减少了 17%, II 等面积则相应地增加, 表明变权使部分极差的评价因素对土壤质量的限制性影响在评价结果中得到了体现; IV 等面积没有变化, 是因为东莞实验区内没有完全不适宜作物种植的农业土壤, 评价结果中的 IV 等土壤全部是建设用地或水面的缘故。

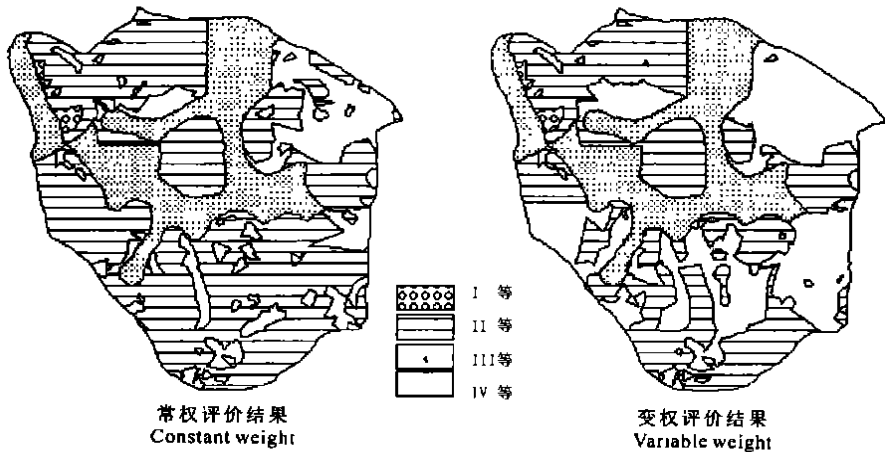


图 2 东莞实验区土壤质量评价图

Fig. 2 Map of soil quality evaluation of Dongguan experimental field

表 6 东莞实验区土壤质量评价结果

Table 6 Soil quality evaluation of Dongguan experimental field

土壤质量等级 Rank of soil quality	I	II	III	IV	合计 Total
综合评价值	[3. 5, 4]	[2. 5, 3. 5]	[1. 5, 2. 5]	(0, 1. 5)	
常权评价结果 (hm ²)	0. 96	77. 43	23. 72	31. 95	134. 06
(%)	7. 16	57. 76	17. 69	23. 83	100. 00
变权评价结果 (hm ²)	0. 96	53. 76	47. 39	31. 95	134. 06
(%)	7. 16	40. 10	35. 35	23. 83	100. 00

实地调查验证表明, 变权评价的结果更附合实验区土壤质量的实际情况。证明变权评价的方法比常权评价能更好地反映土壤质量的实际情况。

参 考 文 献

1. 赵其国, 孙波, 张桃林. 土壤质量与持续环境: I. 土壤质量的定义及评价方法. 土壤, 1997, (3): 113~ 120
2. Karlen D L, M ausbach M J, Doran J W *et al.* Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. Soil Sci. Soc. Am. J., 1997, 61: 4~ 10
3. Doran J W, Jones A J. Methods for Assessing Soil Quality. SSSA Special Publication. No. 47, 1996
4. 张桃林, 潘剑君, 赵其国. 土壤质量研究进展与方向. 土壤, 1999, 31(1): 1~ 7
5. Hu Yueming, Daijun, Wang Renchao. GIS-based red soil resources classification and evaluation. Pedosphere, 1999, 9(2): 131~ 138
6. ERSI. Understanding GIS—The ARC/INFO method. CA: ERSI Inc, 1997. 1~ 10~ 39
7. 贺仲雄. 模糊数学及其应用. 天津: 天津科学技术出版社. 1985. 52~ 72
8. 因素空间理论与知识表示的数学框架(Ⅷ) —变权综合原理. 模糊系统与数学, 1995, (3): 1~ 9

GIS-BASED SOIL QUALITY EVALUATION WITH FUZZY VARIABLE WEIGHT

Hu Yue-ming¹ Wan Hong-fu² Wu Zhifeng² Wu Gu-feng³ Li Hua-Xing¹

(1 GIS Lab, South China Agricultural University, Guangzhou 510642)

(2 Soil and Eco-Environmental Research Institute, Guangzhou)

(3 Fushan Normal College, Fushan, Guangdong)

Summary

Based on the technique of Geographic Information System and mathematical models, Dongguan Agricultural Modernization Experimental Field for Red Soil Areas was taken as the research site for soil quality evaluation. ArcInfo was adopted to data processing, and overlay analysis to spatial data analysis. Evaluation units were determined by combination of evaluation factors. AHP was applied to judge the weight of each evaluation factor. After evaluation criteria was fuzzified, variable weight evaluation was carried out. The results were calculated and mapped by using ArcView GIS software. Difference between results from evaluation with variable and constant weight was compared and analyzed. Results show that soil quality evaluation with variable weight is better than with constant weight.

Key words Geographic Information System (GIS), Soil quality, Evaluation, Variable weight