

# 农业开发区可持续土地利用系统结构模型研究

东野光亮<sup>1</sup>, 赵文武<sup>2</sup>, 张银辉<sup>1</sup>, 刘洪义<sup>1</sup>

(1. 山东农业大学; 2. 中国科学院生态环境研究中心)

**摘 要:** 农业开发区可持续土地利用系统包含社会、经济、自然生态等多种要素, 要素间的相互作用决定系统的动态发展, 把握系统要素的结构层次和互动效应是进行农业开发区可持续土地利用研究、建立相应评价指标体系的前提和基础。该文应用解释结构模型法 (ISM 法), 以济南农业高新技术开发区为例, 在构建农业开发区可持续土地利用系统结构模型的基础上, 对其进行布尔运算和可达矩阵的分解, 得出相应的结构矩阵和递阶结构模型图, 并初步探讨了该结构模型在评价指标体系构建方面的应用。研究结果表明, 该结构模型图能够清晰地反映出土地利用系统各要素的空间递阶关系, 为划分研究对象, 建立济南农业开发区可持续土地利用的评价指标体系提供依据。

**关键词:** 可持续土地利用系统; 结构模型; 矩阵; ISM

**中图分类号:** F30112

**文献标识码:** A

**文章编号:** 100226819(2002)0220165206

农业开发区可持续土地利用系统作为由多种农作系统与其他非生产性自然、半自然和人文土地利用类型共同构成的区域土地利用系统, 涉及社会、经济、自然生态和硅谷效应等众多因素<sup>[1, 2]</sup>, 具有明显的系统复杂性和结构层次的潜在性。对其系统结构的研究有助于把握因素的互动层次关系和主要作用对象, 揭示系统的本质特征, 从而为进一步的评价指标体系建立、可持续土地利用评价提供前提和基础。但是, 在目前国内外的相关研究中<sup>[3, 4]</sup>, 对土地利用系统要素和结构的分析多是停留在定性的描述上, 或采用模型方法结合 GIS 技术对单一土地利用系统进行模拟和分析<sup>[5-7]</sup>, 而针对区域性复合土地利用系统的结构, 进行定量分析的研究并不多见。

解释结构模型法 (Interpretive Structural Modeling, 简称 ISM) 作为结构模型分析的一种方法<sup>[8]</sup>, 在研究复杂系统要素间的关系、揭示系统结构的内在规律、提取有用信息等方面具有良好的应用效能<sup>[9, 10]</sup>, 因而, 该方法在分析土地利用系统要素和结构上也具有其应用的可能性与可行性。本文以济南农业开发区为对象, 探讨了应用 ISM 法构建可持续土地利用系统结构模型的具体过程和该模型在评价指标体系构建中的应用, 即在构建农业开发区可持续土地利用系统结构模型的基础上, 对其进行布尔运算和可达矩阵的分解, 从而得出相应的结构矩阵和递阶结构模型图, 并在此基础上, 简析了该结构

模型在构建评价指标体系中的应用。研究结果表明, 应用 ISM 法进行土地利用系统的分析研究, 可以清晰地反映出土地利用系统各要素的空间递阶关系, 从而为划分研究对象, 进而建立可持续土地利用的评价指标体系提供科学依据。

## 1 结构模型与 ISM 法

### 1.1 结构模型

系统的结构模型是一种介于概念模型与数学模型之间的客观模型, 着重揭示系统的几何学或拓扑学的定性结构, 而不同于在模型的代数描述或数量统计的性质上, 多用图表来表明系统各部分、各要素间的相互关系<sup>[8]</sup>。

### 1.2 ISM 法

ISM 法是一种分析系统结构模型的方法, 是将复杂的问题分解成很多子问题, 利用人的直观借助计算机, 综合性地、系统地确定问题的顺序, 从而达到分析研究系统结构的目的。其研究问题的一般步骤是: 问题设定 选择要素 结构模型表达 求取可达矩阵 区域分解 级间分解 建立结构矩阵 确定系统多级递阶矩阵。

## 2 系统结构模型构造

### 2.1 问题设定和要素选择

#### 2.1.1 研究区域概况

济南农业开发区地处济南市长清县平安店镇, 为省级农业高新技术产业开发示范区, 其内包含农业用地系统和非农业用地系统。其中, 农业用地系统主要指种植业示范基地, 它是由农户或开发区单位实施的多个土地利用系统所构成的农作系统。非农业用地系统主要指科研基地、企业以及相关工业等

收稿日期: 2001204216 修订日期: 2002202210

作者简介: 东野光亮 (1950- ), 男, 山东泰安人, 教授, 硕士生导师, 中国农业工程学会高级会员, 山东农业工程学会土地利用工程专业委员会主任, 主要研究方向为土地规划与评价、土壤环境等。山东泰安 山东农业大学资源与环境学院, 271018

的土地利用系统(不含水域、农村居民点),如现代园艺场、养鸡场和生物技术开发中心等。

### 21112 问题设定

对济南农业开发区可持续土地利用的研究旨在探讨实现该区域土地利用系统可持续发展的影响条件和限制因素,从而为制定、采取相应对策提供依据。因而,该土地利用系统的结构模型应体现因素间的相互影响关系和行为效应。同时,由于该区域土地利用系统包含不同土地利用系统,其要素选择以该区域土地利用的综合特征、农业开发区的特点和可

持续土地利用要求为依据。

### 21113 要素选择

由来自教学科研部门的土地专家和济南农业开发区的实际工作者组成 12 人 ISM 小组,其中教授、副教授占 41.17%,高级工程师、研究员各占 16.17%,讲师、工程师占 25%。该小组成员根据自己的专业经验和济南农业开发区的基本特征,从各自角度提出方案要素,经归纳处理得政策制度、经济投入等 16 项要素(图 1)。

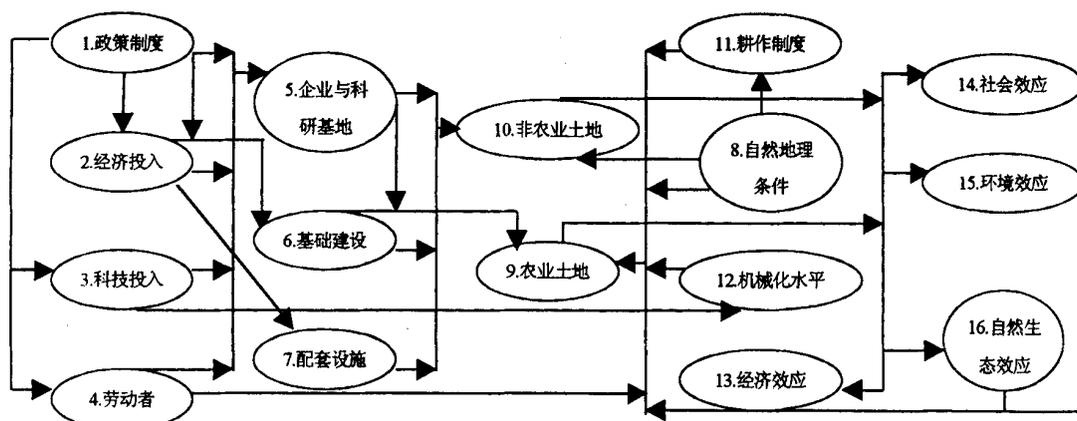


图 1 济南农业开发区可持续土地利用系统结构模型图(未利用土地不在评价范围之内,故不予考虑。)

Fig 1 Structure model for sustainable land use system in Jinan Agricultural Developing Zone

## 212 结构模型构造

### 21211 有向连接图

有向连接图的构建是以要素间的相互关系为依据的,一般“关系”有多种含义,如优先关系、因果关系、影响程度、重要程度等<sup>[8]</sup>,本研究是以济南农业开发区土地利用系统要素间的直接影响关系为依据来建立有向连接图的,若  $i$  项要素对  $j$  项要素有直接影响时,则用直线连接要素  $i$  和要素  $j$ ,并用箭头直接指向  $j$ ,其中,要素间的影响关系具有传递性。根据 ISM 小组对系统要素间的因果关系和影响情况的认识,参照上述原则,可得到济南农业开发区可持续土地利用系统的结构模型,其有向连接图见图 1。

### 21212 邻接矩阵

邻接矩阵是用来表示有向图中各节点之间的连接状态,表达的是一种布尔关系。根据邻接矩阵的定义

$$A = (a_{ij})_{n \times n}$$

式中  $a_{ij} = \begin{cases} 0 & b_i \text{ 与 } b_j \text{ 无直接关系时} \\ 1 & \text{当 } b_i \text{ 与 } b_j \text{ 有直接关系时} \end{cases}$  (当  $b_i$  为系

统中的  $n$  个要)

可得相应的关系邻接矩阵,如下邻接矩阵图所示。

该邻接矩阵是用定量的方式表示出济南农业开发区可持续土地利用系统要素的直接影响关系,是有向连接图的数学表达,该矩阵为进一步的模型求解提供了基础。

## 3 求解结构模型

### 311 可达矩阵计算

可达矩阵是以矩阵的形式表示有向图中各节点之间通过一定路径可以到达的程度,其实质是表达系统内部元素之间所存在的某种间接关系。根据布尔关系的自反性与传递性,对邻接矩阵进行布尔运算

- (1) 和单位矩阵  $I$  相加:  $A_1 = A + I$
- (2) 求幂运算:  $A_i = (A + I)^i$

通过四次求幂运算发现  $A_4 = A_3$ ,从而确定济南农业开发区可持续土地利用系统可达矩阵:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
A = 8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
2	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1
3	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1
4	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
5	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
6	0	0	0	0	0	21	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
7	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1
M = 8	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1

矩阵中, 当  $a_{ij} = 1$  时, 表示要素  $i$  至多经过 3 步路径可影响到要素  $j$ ; 当  $a_{ij} = 0$  时, 表示要素  $i$  对要素  $j$  没有产生影响。

312 区域分解

由于济南农业开发区可持续土地利用系统中的要素都相互关联, 其结构模型为全连通图, 故该系统只有一个区域, 无须对可达矩阵进行区域分解。

313 级间分解

级间分解是在同一区域内, 分离出不同级别的

元素节点。根据级间分解条件

$$\text{可达性集合 } R(i) \quad \text{先行集合 } S(i) = \text{可达性集合 } R(i)$$

其中  $R(i) = \{j | \beta_{ij} = 1\}, S(i) = \{j | \beta_{ij} = 1\}; i, j$  为元素或节点。对济南农业开发区土地利用系统的可达矩阵  $M$  进行分级, 得表 1 如下。

表 1 可达矩阵第一级分解

Table 1 The first decomposing of reachable matrix

$i$	$R(i)$	$S(i)$	$R(i)$	$S(i)$
1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16	1	1	1
2	2, 5, 6, 7, 9, 10, 13, 14, 15, 17	1, 2	2	2
3	3, 5, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16	1, 3	3	3
4	4, 5, 9, 10, 13, 14, 15, 16	1, 4	4	4
5	5, 9, 10, 13, 14, 15, 16	1, 2, 3, 4, 5	5	5
6	6, 9, 10, 13, 14, 15, 16	1, 2, 6	6	6
7	7, 9, 10, 13, 14, 15, 16	1, 2, 7	7	7
8	8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16	8	8	8
9	9, 13, 14, 15, 16	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16	9, 15, 16	9, 15, 16
10	9, 10, 13, 14, 15, 16	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10	10	10
11	9, 11, 13, 14, 15, 16	8, 11	11	11
12	9, 12, 13, 14, 15, 16	1, 3, 12	12	12
13	13	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16	13	13
14	14	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16	14	14
15	9, 13, 14, 15, 16	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16	9, 15, 16	9, 15, 16
16	9, 13, 14, 15, 16	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16	9, 15, 16	9, 15, 16

则  $T_1 = \{i \mid R_1(i) = S_1(i) = R_1(i)\} = \{13, 14\}$ , 即该系统的第一级为节点 13、14, 即在第一级的分解中, 首先分离出农业开发区土地利用系统要素中的经济效应和社会效应。依次类推, 共进行了 6 次分解, 得  $T_1 = \{13, 14\}$ ;  $T_2 = \{9, 15, 16\}$ ;  $T_3 = \{10, 11, 12\}$ ;  $T_4 = \{5, 6, 7, 8\}$ ;  $T_5 = \{2, 3, 4\}$ ;  $T_6 = \{1\}$ , 从而将所有系统要素分成 6 个级别。

根据分解结果, 将节点次序变位, 得新的可达矩阵  $M$ 。

314 建立结构矩阵

由可达矩阵  $M$  减去单位矩阵  $I$  得新矩阵  $M'$ , 再从  $M'$  依次找高一級与低一级元素的关系, 同时剔除上一级节点, 参照结构模型图, 确定结构矩阵:

	13	14	9	15	16	10	11	12	5	6	7	8	2	3	4	1
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0

该结构矩阵是反映济南农业开发区可持续土地利用系统多级递阶结构的矩阵, 是系统多级递阶结构图的数学表达。

315 递阶结构模型图

根据结构矩阵, 确定济南农业开发区可持续土

地利用系统的递阶结构模型图(见图 2)。

由该结构模型图可以看出, 第五、六层要素是济南农业开发区土地利用系统的基础, 表现为社会经济的投入, 而政策制度是决定农业开发区建设与

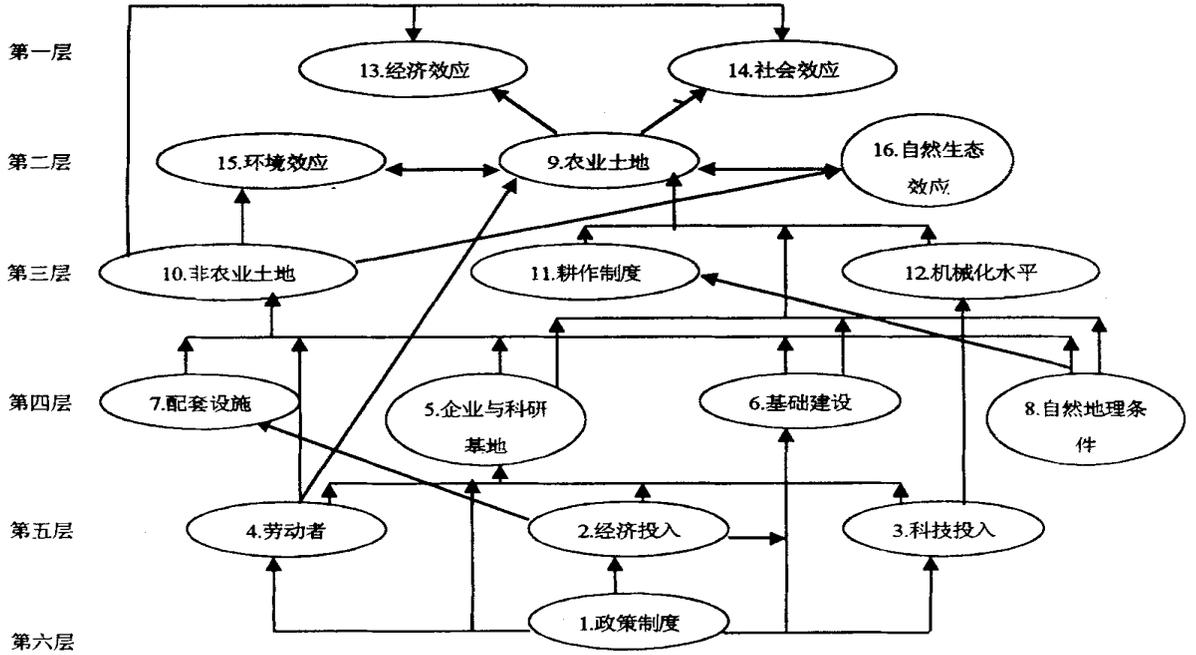


图 2 济南农业开发区可持续土地利用系统递阶结构模型图

Fig 2 Step-up structure model for sustainable land use system in Jinan Agricultural Developing Zone

发展的先决条件。第三、四层和第二层中的农业用地为土地利用部分,其中自然地理条件作为土地利用现状的基础与第五、六层要素共同构成了济南农业开发区土地利用系统的输入;其余要素则构成了土地利用系统的核心。第一、二层是整个系统的输出部分(其中农业用地由于和自然生态效应和环境效应有一定的反馈关系而进入第二层,但在具体分析时应将起划入土地利用部分),表现为自然生态、社会、经济、环境等效应,其中自然生态效应和环境效应又是社会、经济效应的基础。该结构模型图可以比较清晰地看出济南农业开发区可持续土地利用系统内各要素的空间递阶关系,体现系统的物质流动方向和“输入-土地利用-输出”的空间结构。

#### 4 结构模型的应用——评价指标体系框架的构建

根据该土地利用系统的空间结构,结合面向对象思想,可以将济南农业开发区的土地利用系统划分为土地层、土地利用方式层、劳动力层、资源环境层和社会经济层 5 个要素层<sup>[11]</sup>。参照系统的递阶结构模型图,各要素层之间的相互作用如图 3 所示。

其中,土地层为土地利用系统提供基本的利用条件,即土地能力;系统通过一定的利用方式又反过来增强或削弱其基本能力,产生一定的土地利用变化;土地利用系统的外界环境(社会经济、劳动力和资源环境)为土地利用系统提供物质、能量的输入,

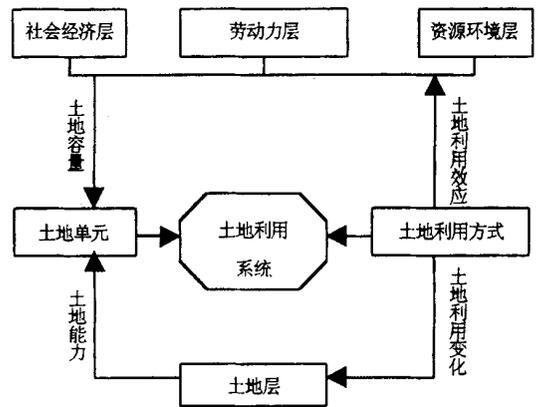


图 3 土地利用系统对象间的相互作用

Fig 3 Interaction of the objects in land use system

表现为土地容量;同时,系统也产生了一定的效应影响系统外界因素,改变社会经济、资源环境的变化或劳动力的流动等,即土地利用效应。在系统要素层的相互作用中,土地容量与递阶结构模型中第五、六层的社会经济投入指标相对应;土地能力与第四层的自然地理条件相对应;土地利用变化是土地利用系统核心(第三、四层与第一层的农业用地)的直接反应;第一、二层的输出部分则通过土地利用效应反应出来。

据此,济南农业开发区可持续土地利用系统的发展水平可以通过土地能力、土地容量、土地利用变化、土地利用效应 4 类指标来反应出来,即济南农业开发区可持续土地利用评价的指标体系框架<sup>[12]</sup>(见

图 4):

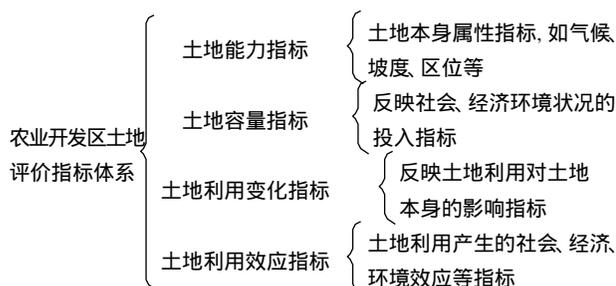


图 4 农业开发区可持续土地利用评价指标体系框架图

Fig 4 The basic frame of index system for land sustainable use evaluation in agricultural developing zone

## 5 结 论

应用 ISM 法以定量化的方式分析农业开发区可持续土地利用系统要素间的相互关系, 可以较好揭示该复合土地利用系统内部各要素的空间递阶关系, 进而反映土地利用的动态过程, 从而为划分研究系统对象、建立农业开发区可持续土地利用系统评价指标体系提供理论依据。

### [参 考 文 献]

- [1] 宇振荣, 邱建军, 王建武 土地利用系统分析方法与实践[M] 北京: 中国农业科技出版社, 1998: 24~ 37.  
[2] Smyth A J, Dumanski J. A framework for evaluating sustainable land management [J]. Can J

Soil Sci, 1995, 75: 401~ 406

- [3] Dumanski J, Land quality and the threshold and indicators of sustainable land management [J]. ITC Journal, 1997, 30(4): 216~ 222.  
[4] 刘彦随 区域土地利用系统优化调控的机理与模式 [J]. 资源科学, 1999, 21(4): 60~ 65.  
[5] 史 华 土地系统研究的方法探讨 [J]. 自然资源, 1996, (1): 29~ 35.  
[6] Sharifi, Van Keulen H. A decision support system for land use planning at enterprise level [J]. Agricultural Systems, 1994, (45): 239~ 257.  
[7] Stoorvogel J J, Schipper R A, Janse D M. U STED: A methodology for a quantitative analysis of land use scenarios Netherlands Journal of Agricultural Science, 1995, (43): 5~ 18.  
[8] 程建权 城市系统工程 [M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1996: 45~ 54.  
[9] Raghuvanshi P S, Satish Kumar On the structuring of Systems with Fuzzy Relations [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2001, 29(4): 546~ 547.  
[10] 黄 丽, 蔡长林 模糊解释结构模型 [J]. 四川大学学报, 1999, 36(11): 6~ 10.  
[11] 赵文武, 张银辉 农业开发区可持续土地利用系统分析 [J]. 农业经济, 2001, (2): 39~ 41.  
[12] 赵文武 农业开发区土地可持续利用评价研究 [D]. 泰安: 山东农业大学资源与环境学院, 2001.

## Structural Modeling of Sustainable Land Use System in Agricultural Developing Zone

Dongye Guangliang<sup>1</sup>, Zhao Wenwu<sup>2</sup>, Zhang Yinhu<sup>1</sup>, Liu Hongyi<sup>1</sup>

(1. College of Environment and Resources, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;

2. Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Sustainable land use system in agricultural developing zone consists of many factors such as social, economic and natural environmental factors, in which mutual effects among the factors determine the dynamic development of the system. It is the premise and basis to master the structure arrangement and mutual effects in studying sustainable land use and establishing the corresponding evaluation index system in agricultural developing zone. In this article, Jinan Agricultural Developing Zone is taken as an example. Based on the establishment of structure model for sustainable land use system in agricultural developing zone, the methods of Boolean operations and decomposing the reachable matrix are used, and in the end the structural matrix and modeling chart are worked out by means of Interpretive Structural Modeling (ISM). Furthermore, the evaluation index system framework is discussed to test the model. The result suggests that the model displays clearly the spatial step-up relationship of factors in land use system, thus providing the basis for establishing evaluation index system for sustainable land use in Jinan Agricultural Developing Zone.

**Key words:** sustainable land use system; structural model; matrix; Interpretive Structural Modeling (ISM)